

TELESCOPIOS DE NEUTRINOS



Guillermo Pascua Ramón
IFIC, CSIC-UV

IFIC Summer Student Programme 2026
23 · 07 · 2026



IFIC INSTITUT DE
FÍSICA
CORPUSCULAR

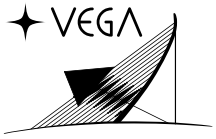
★ **VEGA**



1. UN ENIGMA, UNA CARTA Y UN EXPERIMENTO CON NOMBRE DE FANTASMA



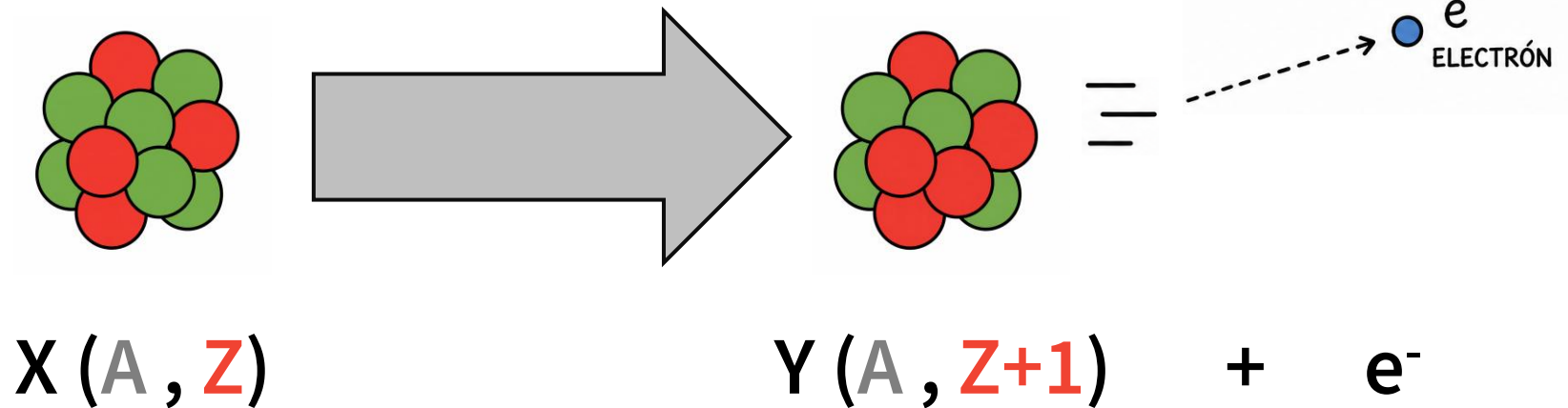
EL ENIGMA: LA DESINTEGRACIÓN BETA



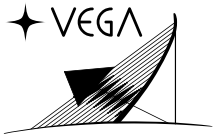
A **principios del siglo XX**, se conocían bien dos aspectos acerca de la **radiación beta**:

- Este tipo de radiactividad **cambiaba la composición química** de la sustancia que la emitía.
- Estaba **compuesta por electrones**.

● = PROTÓN
● = NEUTRÓN



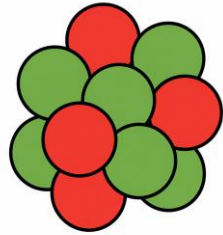
EL ENIGMA: LA DESINTEGRACIÓN BETA



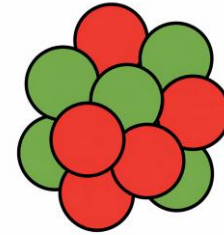
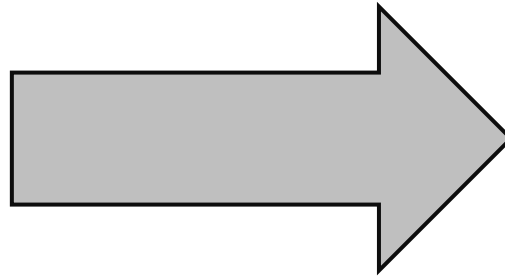
A **principios del siglo XX**, se conocían bien dos aspectos acerca de la **radiación beta**:

- Este tipo de radiactividad **cambiaba la composición química** de la sustancia que la emitía.
- Estaba **compuesta por electrones**.

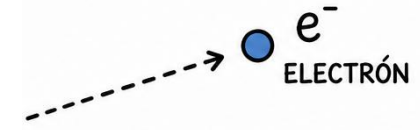
● = PROTÓN
● = NEUTRÓN



$X (A, Z)$



$Y (A, Z+1)$



+ e^-

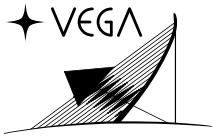
¡¡PROBLEMA!!

Energía total inicial (X)

>

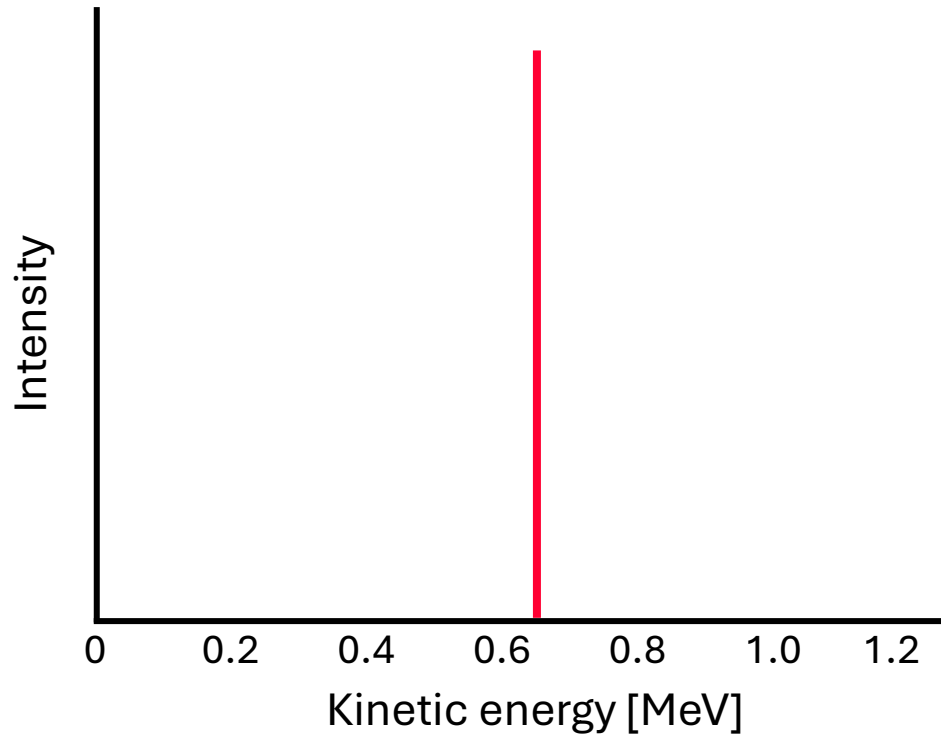
Energía total final (Y + e^-)

EL ENIGMA: LA DESINTEGRACIÓN BETA

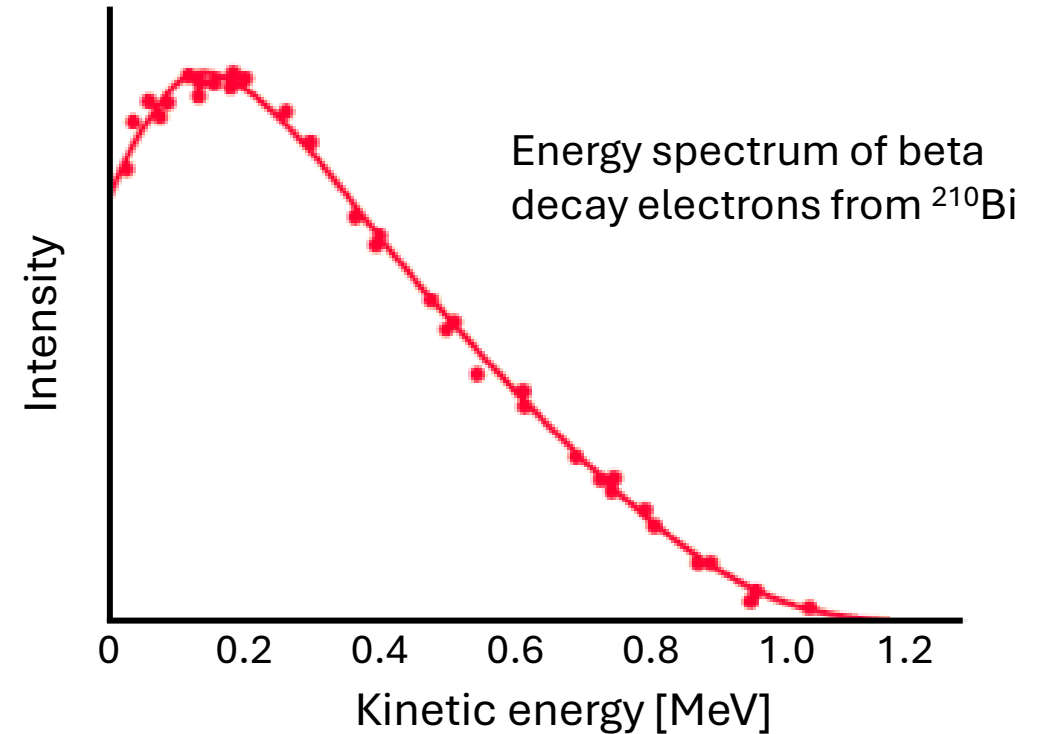


En una **desintegración a dos cuerpos**, la conservación de la energía y el momento lineal fijan la **energía de las partículas en el estado final**, que quedan **unívocamente determinadas**.

ESPECTRO ESPERADO*



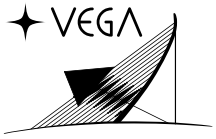
ESPECTRO MEDIDO



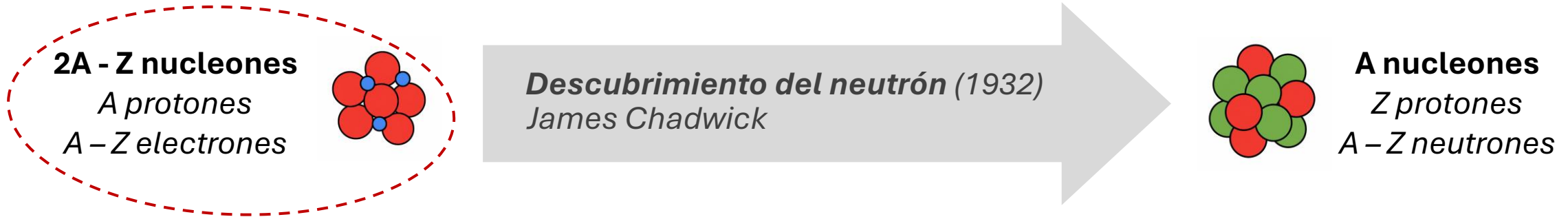
***teórico** (efectos experimentales y resolución energética no incluidos)

Espectro de energía experimental tomado de G. J. Neary, [Roy. Phys. Soc. \(London\)](#), A175, 71 (1940).

EL ENIGMA: LA DESINTEGRACIÓN BETA



Además, el modelo de la estructura atómica era diferente al actual. **¡Aún no se había descubierto el neutrón!**



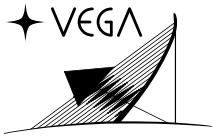
¡¡PROBLEMA #2!!

Esto introducía **un nuevo problema relacionado con el espín de los núcleos** (spin-statistics) y las **partículas** involucradas en la desintegración beta.

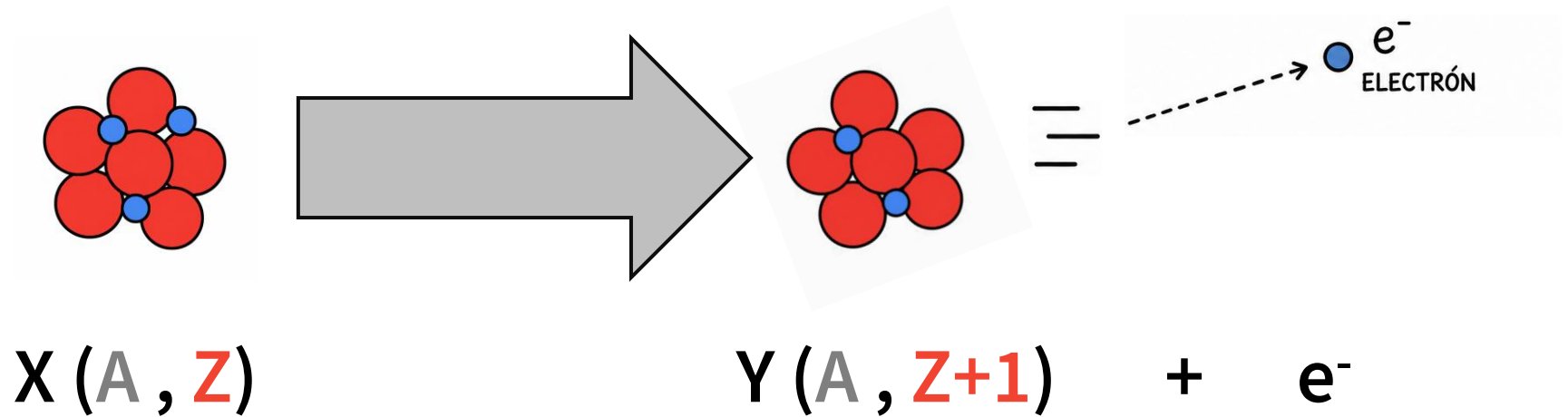
Además, **se observaba que el momento angular total del sistema parecía no conservarse en ciertos procesos β .**

¡¡PROBLEMA #3!!

EL ENIGMA: LA DESINTEGRACIÓN BETA



En resumen, la **imagen** que se tenía sobre el **origen de la radiación beta** era la siguiente:



Donde:

- La evidencia experimental indicaba que **no se cumplía la conservación de la energía**.
- En ciertos procesos parecía que **tampoco se conservase el momento angular** total.
- El **modelo nuclear protón-electrón presentaba serios problemas**, como la discrepancia entre el espín predicho y medido para ciertos núcleos (ej. ^{14}N).

LA CARTA

Open letter to the group of radioactive people at the
Gauverein meeting in Tübingen.

Zürich, Dec. 4, 1930
Gloriastrasse

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

[...], I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin $1/2$ and obey the exclusion principle [...]. - The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

[...] Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7. [...]

signed W. Pauli

original - Photocopy of PLC 0393
Abschrift/15.12.30 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der
Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst
anzuhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich
angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie
des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg
verfallen um den "Wechselssatz" (1) der Statistik und den Energiesatz
zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale
Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren,
welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und
sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie
nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen
müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und
jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. - Das kontinuierliche
beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim
beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert
wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron
konstant ist.

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die
Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint
mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer
dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein
magnetischer Dipol von einem gewissen Moment M ist. Die Experimente
verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons
nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann
 M wohl nicht grösser sein als $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee
zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe
Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis
eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa
 10 mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein
gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein
wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn
sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt,
gewinnt und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum
wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt,
Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat:
"O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen
Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren. -
Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. - Leider kann ich nicht
persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht
vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich
bin. - Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Baek, Euer
untertänigster Diener

ges. W. Pauli



LA CARTA

Open letter to the group of radioactive people at the Gauverein meeting in Tübingen.

Zürich, Dec. 4, 1930
Gloriastrasse

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

[...], I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin $1/2$ and obey the exclusion principle [...]. - The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

[...] Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7. [...]

signed W. Pauli

original - Photocopy of PLCC 0393
Abschrift/15.12.30 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. - Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann μ wohl nicht grösser sein als $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewinnt und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt, Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat: "O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren. - Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. - Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin. - Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Back, Euer untertänigster Diener

ges. W. Pauli



LA CARTA

Open letter to the group of radioactive people at the Gauverein meeting in Tübingen.

Zürich, Dec. 4, 1930
Gloriastrasse

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

[...], I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin $1/2$ and obey the exclusion principle [...]. - The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

[...] Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7. [...]

signed W. Pauli

original - Photocopy of PLCC 0393
Abschrift/15.12.30 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. - Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann μ wohl nicht grösser sein als $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewinnt und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt, Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat: "O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren. - Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. - Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin. - Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Back, Euer untertänigster Diener

ges. W. Pauli



LA CARTA

Open letter to the group of radioactive people at the Gauverein meeting in Tübingen.

Zürich, Dec. 4, 1930
Gloriastrasse

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

[...], I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin $1/2$ and obey the exclusion principle [...]. - The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

[...] Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7. [...]

signed W. Pauli

original - Photocopy of PLCC 0393
Abschrift/15.12.30 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. - Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann μ wohl nicht grösser sein als $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewinnt und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt, Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat: "O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren. - Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. - Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin. - Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Baek, Euer untertänigster Diener

ges. W. Pauli



LA CARTA

Open letter to the group of radioactive people at the Gauverein meeting in Tübingen.

Zürich, Dec. 4, 1930
Gloriastrasse

Dear Radioactive Ladies and Gentlemen,

[...], I have hit upon a desperate remedy to save the "exchange theorem" (1) of statistics and the law of conservation of energy. Namely, the possibility that in the nuclei there could exist electrically neutral particles, which I will call neutrons, that have spin $1/2$ and obey the exclusion principle [...]. - The continuous beta spectrum would then make sense with the assumption that in beta decay, in addition to the electron, a neutron is emitted such that the sum of the energies of neutron and electron is constant.

[...] Unfortunately, I cannot personally appear in Tübingen since I am indispensable here in Zürich because of a ball on the night from December 6 to 7. [...]

signed W. Pauli

original - Photocopy of PLCC 0393
Abschrift/15.12.30 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift

Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse. - Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann μ wohl nicht grösser sein als $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stände, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein gamma-Strahl.

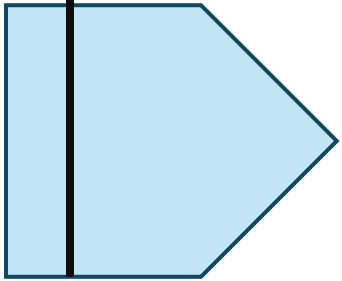
Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewinnt und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt, Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat: "O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren. - Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet. - Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin. - Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Back, Euer untertänigster Diener

ges. W. Pauli



CAMINO DEL ÉXITO

1930 | Pauli postula la existencia de una nueva partícula neutra, ligera, de espín $\frac{1}{2}$ y muy penetrante



original - Photocopy of PLC 0393
Abschrift/15.12.56 PM

Offener Brief an die Gruppe der Radioaktiven bei der Gauvereins-Tagung zu Tübingen.

Abschrift
Physikalisches Institut
der Eidg. Technischen Hochschule
Zürich

Zürich, 4. Dez. 1930
Gloriastrasse

Liebe Radioaktive Damen und Herren,

Wie der Ueberbringer dieser Zeilen, den ich huldvollst anhören bitte, Ihnen des näheren auseinandersetzen wird, bin ich angesichts der "falschen" Statistik der N - und $Li-6$ Kerne, sowie des kontinuierlichen beta-Spektrums auf einen verzweifelten Ausweg verfallen um den "Wechselsatz" (1) der Statistik und den Energiesatz zu retten. Nämlich die Möglichkeit, es könnten elektrisch neutrale Teilchen, die ich Neutronen nennen will, in den Kernen existieren, welche den Spin $1/2$ haben und das Ausschliessungsprinzip befolgen und sich von Lichtquanten ausserdem noch dadurch unterscheiden, dass sie nicht mit Lichtgeschwindigkeit laufen. Die Masse der Neutronen müsste von derselben Grössenordnung wie die Elektronenmasse sein und jedenfalls nicht grösser als $0,01$ Protonenmasse.- Das kontinuierliche beta-Spektrum wäre dann verständlich unter der Annahme, dass beim beta-Zerfall mit dem Elektron jeweils noch ein Neutron emittiert wird, derart, dass die Summe der Energien von Neutron und Elektron konstant ist.

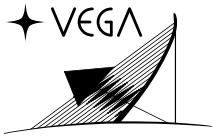
Nun handelt es sich weiter darum, welche Kräfte auf die Neutronen wirken. Das wahrscheinlichste Modell für das Neutron scheint mir aus wellenmechanischen Gründen (näheres weiss der Ueberbringer dieser Zeilen) dieses zu sein, dass das ruhende Neutron ein magnetischer Dipol von einem gewissen Moment μ ist. Die Experimente verlangen wohl, dass die ionisierende Wirkung eines solchen Neutrons nicht grösser sein kann, als die eines gamma-Strahls und darf dann μ wohl nicht grösser sein als $e \cdot (10^{-13} \text{ cm})$.

Ich traue mich vorläufig aber nicht, etwas über diese Idee zu publizieren und wende mich erst vertrauensvoll an Euch, liebe Radioaktive, mit der Frage, wie es um den experimentellen Nachweis eines solchen Neutrons stünde, wenn dieses ein ebensolches oder etwa 10mal grösseres Durchdringungsvermögen besitzen würde, wie ein gamma-Strahl.

Ich gebe zu, dass mein Ausweg vielleicht von vornherein wenig wahrscheinlich erscheinen wird, weil man die Neutronen, wenn sie existieren, wohl schon längst gesehen hätte. Aber nur wer wagt, gewinnt und der Ernst der Situation beim kontinuierlichen beta-Spektrum wird durch einen Ausspruch meines verehrten Vorgängers im Amt, Herrn Debye, beleuchtet, der mir kürzlich in Brüssel gesagt hat: "O, daran soll man am besten gar nicht denken, sowie an die neuen Steuern." Darum soll man jeden Weg zur Rettung ernstlich diskutieren.- Also, liebe Radioaktive, prüfet, und richtet.- Leider kann ich nicht persönlich in Tübingen erscheinen, da ich infolge eines in der Nacht vom 6. zum 7. Dez. in Zürich stattfindenden Balles hier unabkömmlich bin.- Mit vielen Grüssen an Euch, sowie an Herrn Baek, Euer untertänigster Diener

ges. W. Pauli

CAMINO DEL ÉXITO

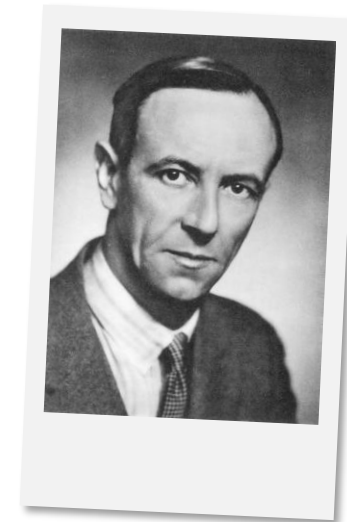
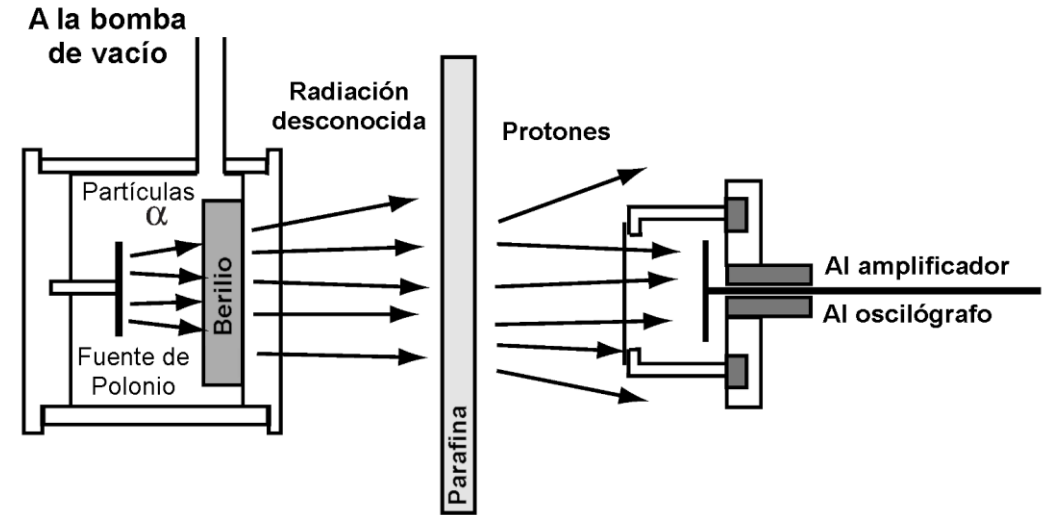


1930 | Pauli postula la existencia de una nueva partícula neutra, ligera, de espín $\frac{1}{2}$ y muy penetrante



1932 | Chadwick descubre el neutrón como un constituyente del núcleo atómico

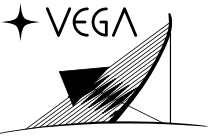
El problema de los espines nucleares (spin-statistics) queda resuelto gracias al nuevo modelo nuclear.



Galardonado con el **Premio Nobel de Física en 1935**



CAMINO DEL ÉXITO

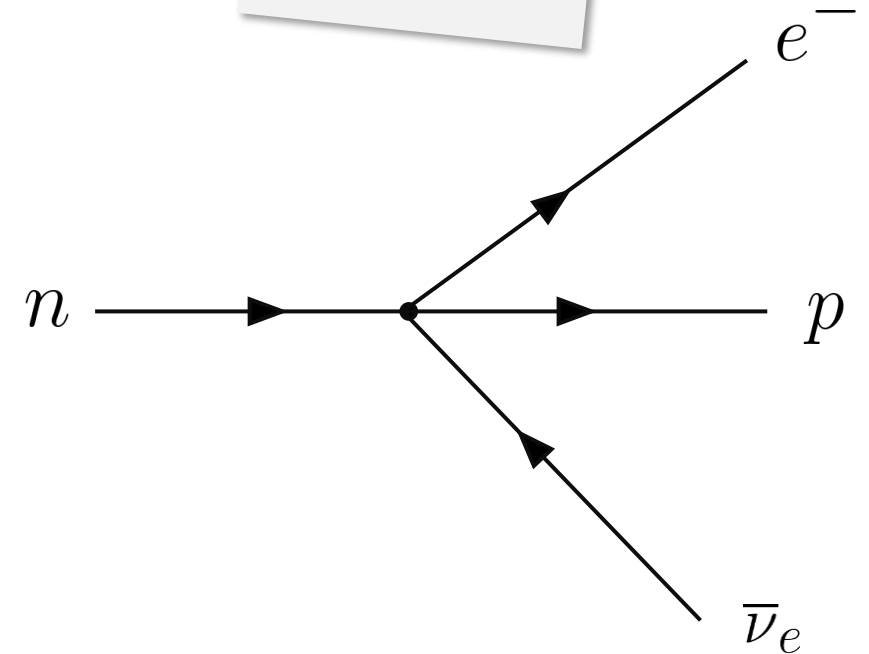


1930 | Pauli postula la existencia de una nueva partícula neutra, ligera, de espín $\frac{1}{2}$ y muy penetrante

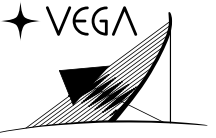
1933 | Fermi formula su teoría sobre la desintegración beta, incorporando al neutrón y al hipotético neutrino

1932 | Chadwick descubre el neutrón como un constituyente del núcleo atómico

El problema de los espines nucleares (spin-statistics) queda resuelto gracias al nuevo modelo nuclear.



CAMINO DEL ÉXITO



C. Cowan

F.
Reines



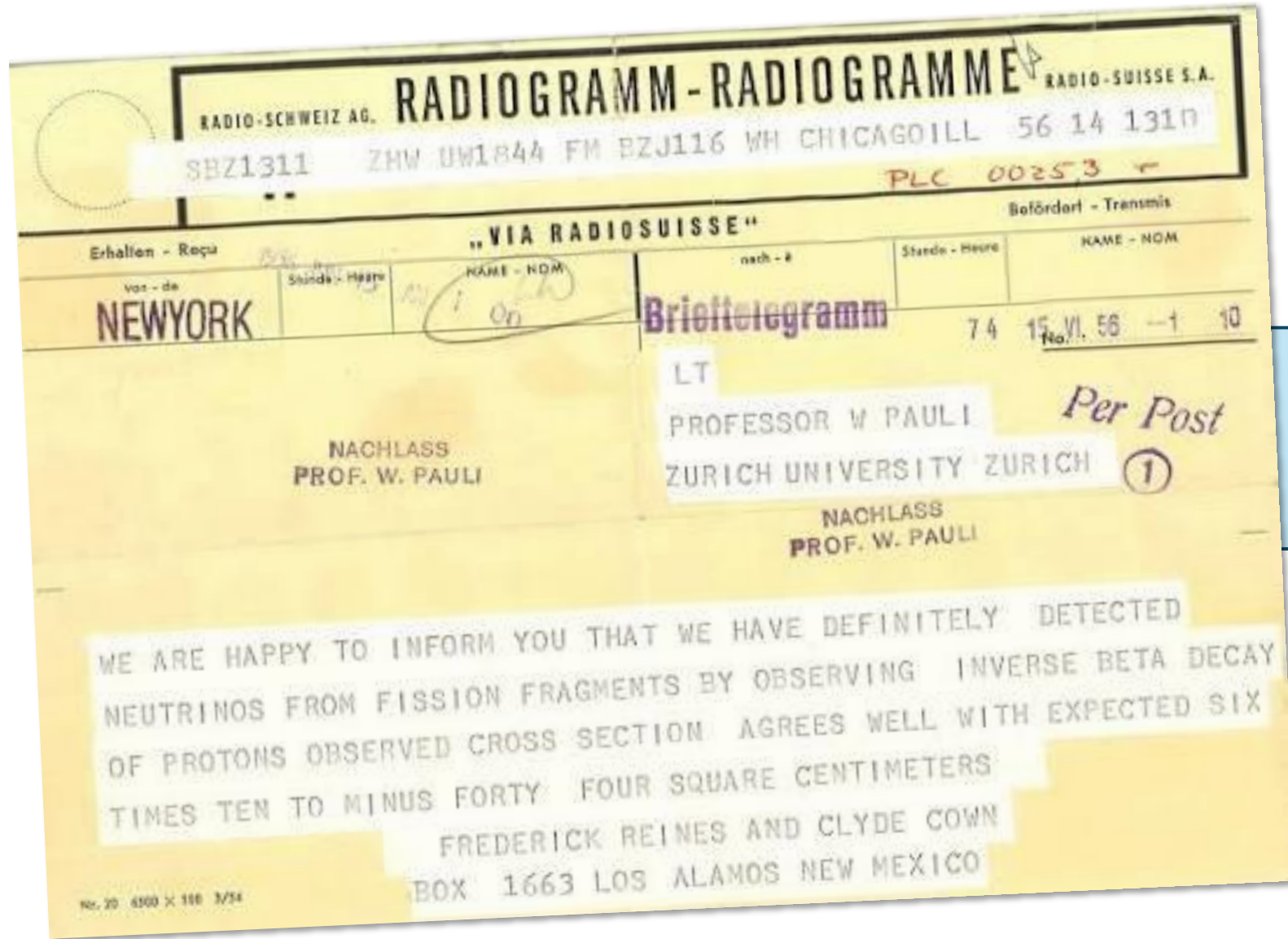
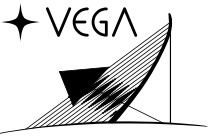
Galardonado con
el **Premio Nobel
de Física en 1995**

1956 | Cowan y Reines descubren
el neutrino en su famoso
experimento a través de la
Inverse Beta Decay (IBD)

26 años después de la carta de
Pauli a sus “*colegas radiactivos*”

Integrantes del experimento bautizado como
PROJECT POLTERGEIST

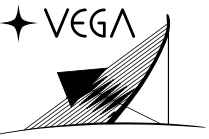
CAMINO DEL ÉXITO



1956 | Cowan y Reines descubren el neutrino en su famoso experimento a través de la Inverse Beta Decay (IBD)

26 años después de la carta de Pauli a sus “*colegas radiactivos*”

CAMINO DEL ÉXITO



RADIOGRAMM - RADIOGRAMME RADIO-SUISSE S.A.

RADIO-SCHWEIZ AG. SBZ1311 ZHW UW1844 FM BZJ116 WH CHICAGOILL 56 14 13

PLC 00253

„VIA RADIOSUISSE“

Erhalten - Reçu: **NEWYORK**

Stunde - Heure: 74 15 VI. 56

NAME - NOM: **LT PROFESSOR W PAULI**

Adresse: **ZURICH UNIVERSITY ZURICH**

NACHLASS: **PROF. W. PAULI**

Brieftelegramm

WE ARE HAPPY TO INFORM YOU THAT WE HAVE DEFINITELY DETECTED NEUTRINOS FROM FISSION FRAGMENTS BY OBSERVING INVERSE BE OF PROTONS OBSERVED CROSS SECTION AGREES WELL WITH EXPECT TIMES TEN TO MINUS FORTY FOUR SQUARE CENTIMETERS

FREDERICK REINES AND CLYDE COWAN
BOX 1663 LOS ALAMOS NEW MEXICO

Nr. 20 4500 X 100 3/54

Frederick REINES and Clyde COWAN
Box 1663, LOS ALAMOS, New Mexico

Thanks for message. Everything comes to him who knows how to wait.

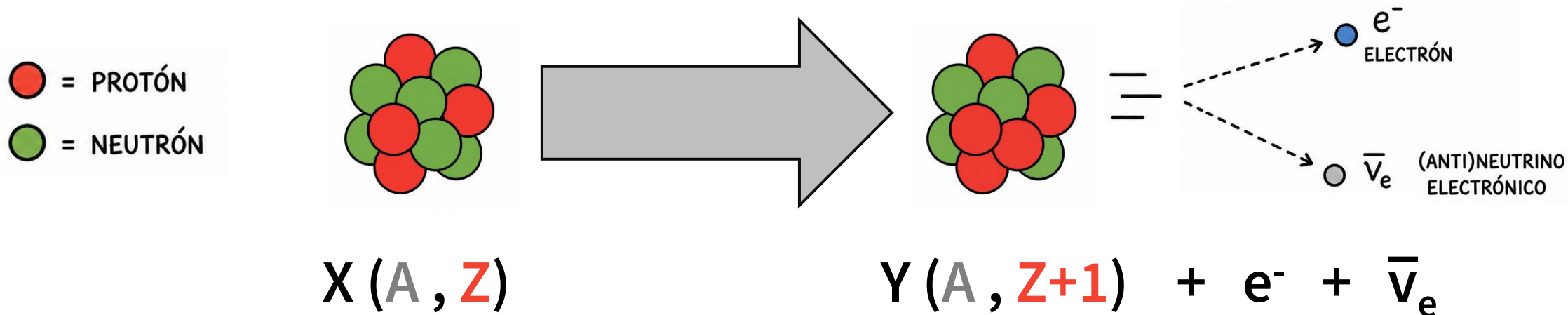
Pauli

rec. 15.6.12 / 15.38R
als light letter

EL ENIGMA RESUELTO



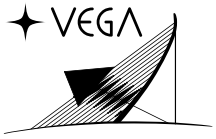
Reuniendo **todas las piezas** (modelo nuclear protón-neutrón, neutrino, etc.), los principales problemas alrededor de la desintegración beta quedarían resueltos:



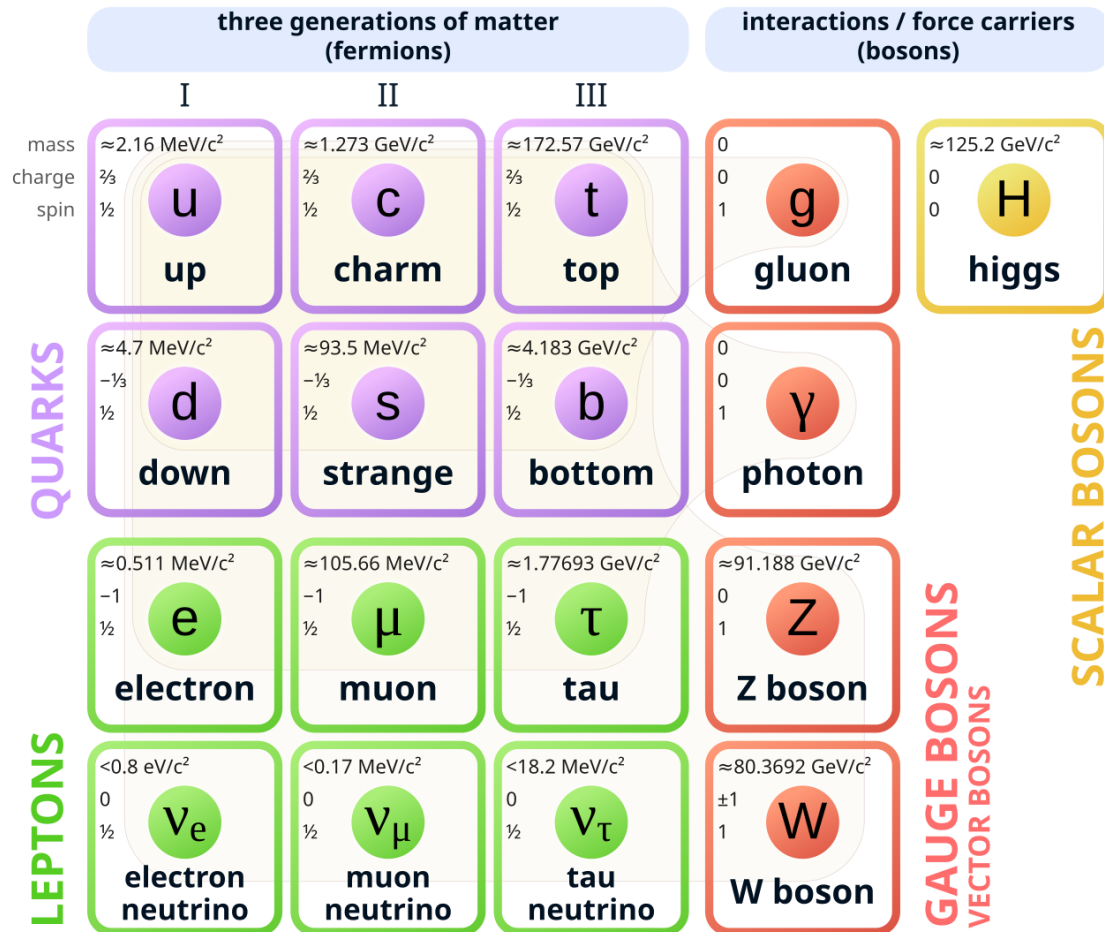
$$\text{Energía total inicial (X)} = \text{Energía total final (Y + e}^- + \nu_e\text{)}$$

No obstante, aún quedaría un **largo camino** que recorrer **hasta llegar al Modelo Estándar** y la forma en que hoy lo entendemos...

EL NEUTRINO EN LA ACTUALIDAD



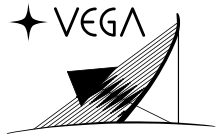
Standard Model of Elementary Particles



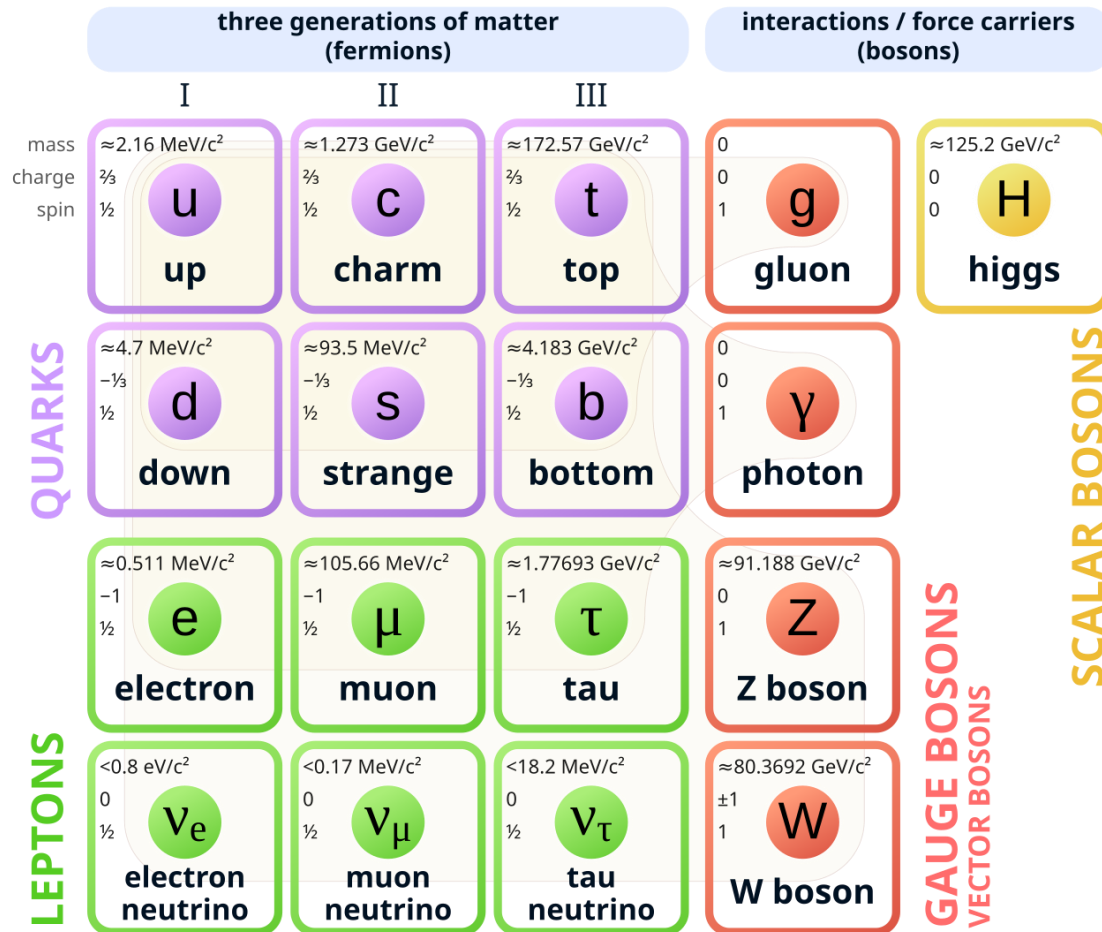
Lo que sabemos (o creemos saber) **a día de hoy:**

- Es la **segunda partícula más abundante del universo**, después de los fotones.
- Son **leptones masivos**, con masas varios órdenes de magnitud menores que la del electrón.
- Solo interactúan a través de la **interacción débil**.
- **Tres sabores** (ν_e , ν_μ , ν_τ) asociados a los estados de la interacción débil.
- **Tres estados de masa definida** (ν_1 , ν_2 , ν_3), mezcla de los tres sabores: **oscilaciones de neutrinos**.

EL NEUTRINO EN LA ACTUALIDAD



Standard Model of Elementary Particles



Lo que (definitivamente) **no sabemos a día de hoy:**

- **Jerarquía de masas** (NO vs IO) y masas exactas.
- Problemas abiertos en **oscilaciones:** parámetros, octante, violación de CP...
- **Naturaleza de Dirac o Majorana:** ¿es el neutrino su propia antipartícula?
- **Origen de su masa,** varios órdenes de magnitud menores que la del electrón.
- **¿Cuáles son las fuentes** que producen **neutrinos y rayos cósmicos de alta energía** en el universo?
- ¿Posible relación con **materia oscura**?

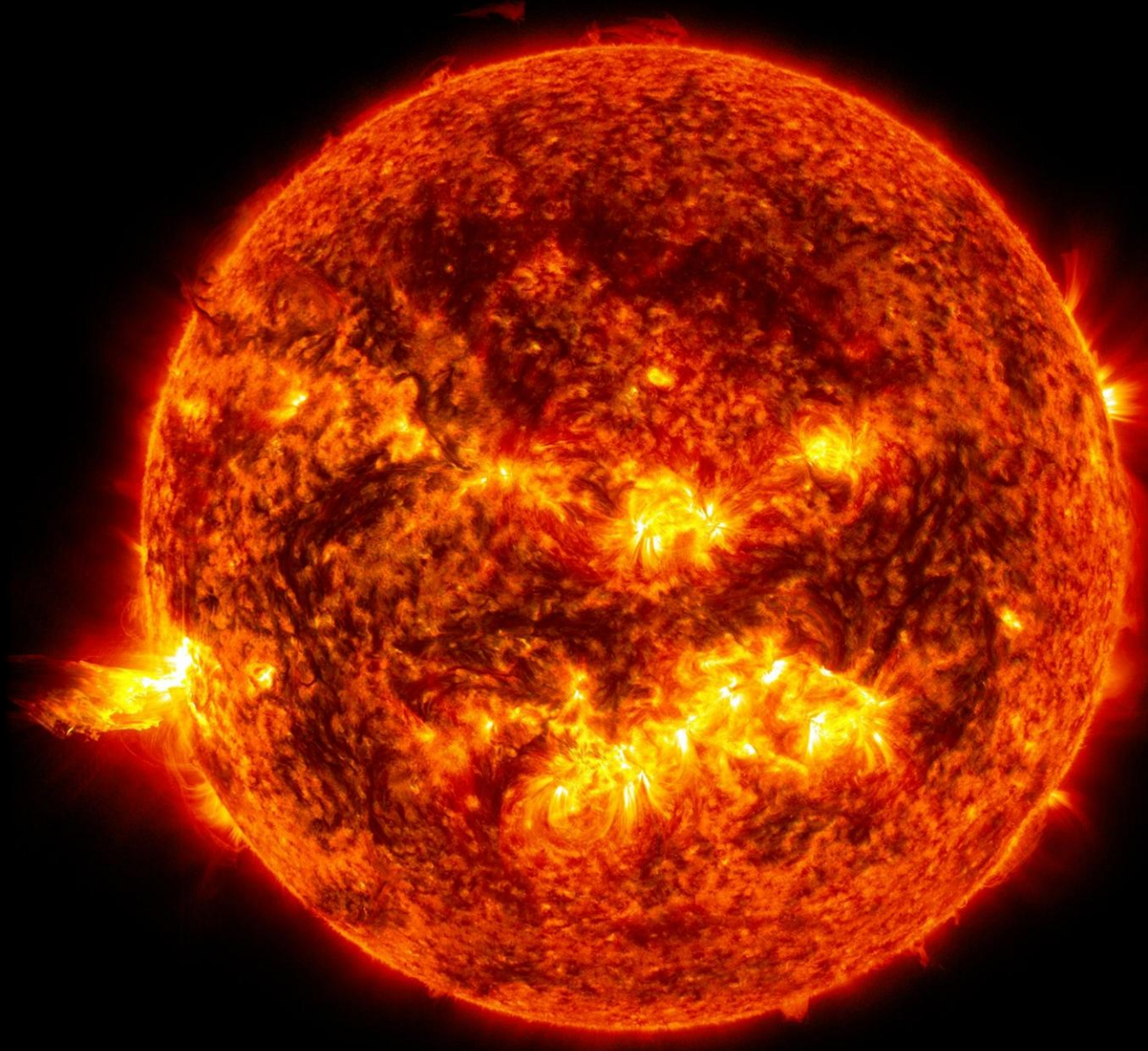


2. NEUTRINOS DEL COSMOS

Cada segundo, alrededor de 10^{14} neutrinos atraviesan nuestro cuerpo.

Cada segundo, alrededor de 10^{14} neutrinos atraviesan nuestro cuerpo.

¿De dónde proceden?



Neutrinos **solares**

Producidos en las **reacciones de fusión nuclear** que tienen lugar en la región más interna del Sol.

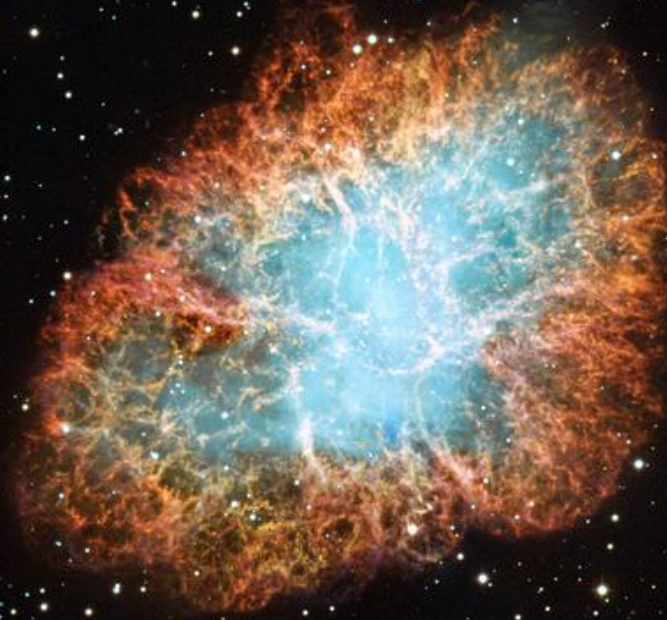
$$\Phi_{\nu} \approx 6 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

Neutrinos de supernova

Durante una core-collapse supernova, alrededor del **99% de la energía** gravitacional del sistema es **emitida en forma de neutrinos**.

Frecuencia de supernovas galácticas:

$$R_{\text{SN}} \simeq 1 - 3 \text{ century}^{-1}$$



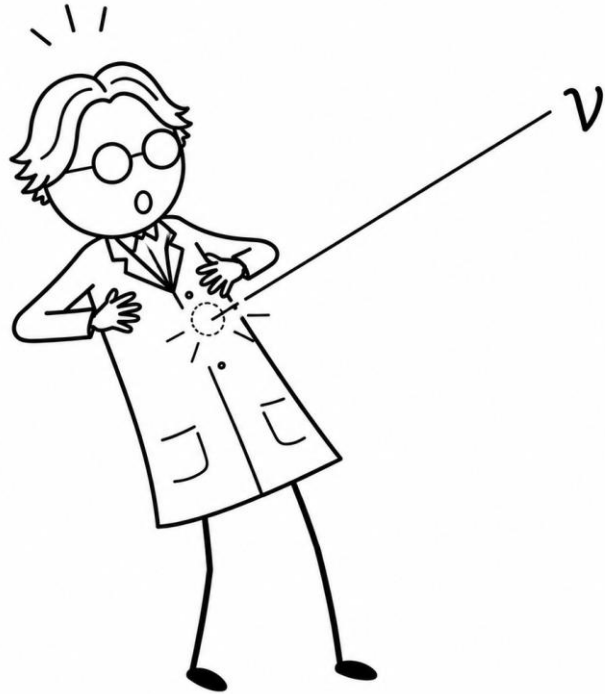
Neutrinos de reactor

Producidos en las **desintegraciones beta de los residuos radiactivos generados** en la fisión nuclear del combustible.



Neutrinos de... ¿humanos?

¡Y no sólo humanos! Ciertos **isótopos radiactivos** están **presentes en muchos seres vivos**, como el **Potasio-40**. Al desintegrarse, emiten neutrinos.



Para una **persona adulta promedio**, la tasa de emisión está en torno a:

$$F_{\nu} \approx 3000 - 6000 \text{ s}^{-1}$$

Neutrinos atmosféricos

Producidos en las **interacciones de rayos cósmicos** (protones, núcleos ligeros) con las capas altas de la **atmósfera terrestre**.

$$\Phi_{\nu} \approx 1 \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$$

p

π^{-}

π^{+}

π^0

μ^{-}

$\bar{\nu}_{\mu}$

e^{-}

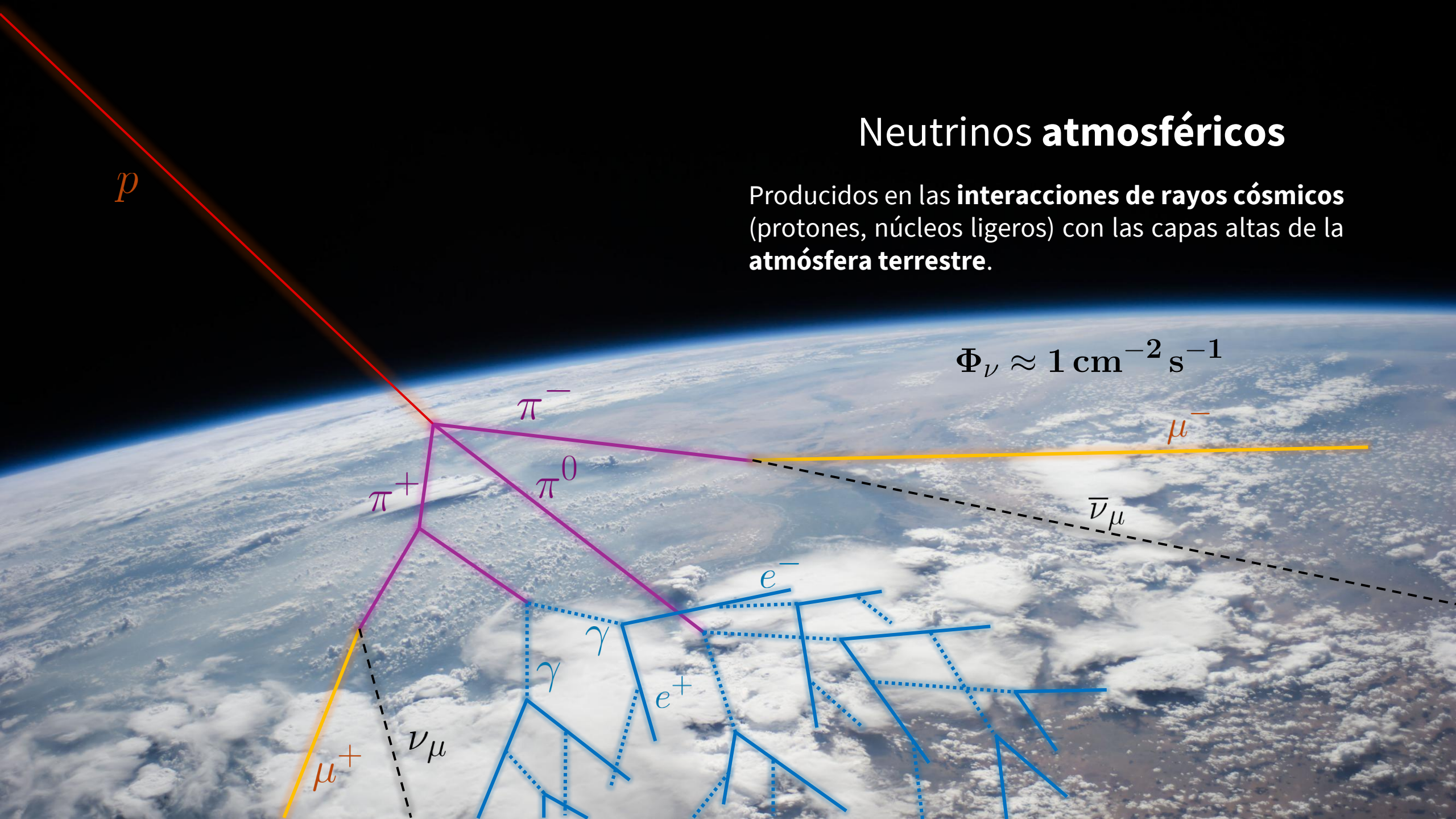
γ

γ

e^{+}

ν_{μ}

μ^{+}



Neutrinos cósmicos de alta energía

Descubiertos en 2013. Producidos en **fuentes astrofísicas durante violentos procesos de aceleración.**

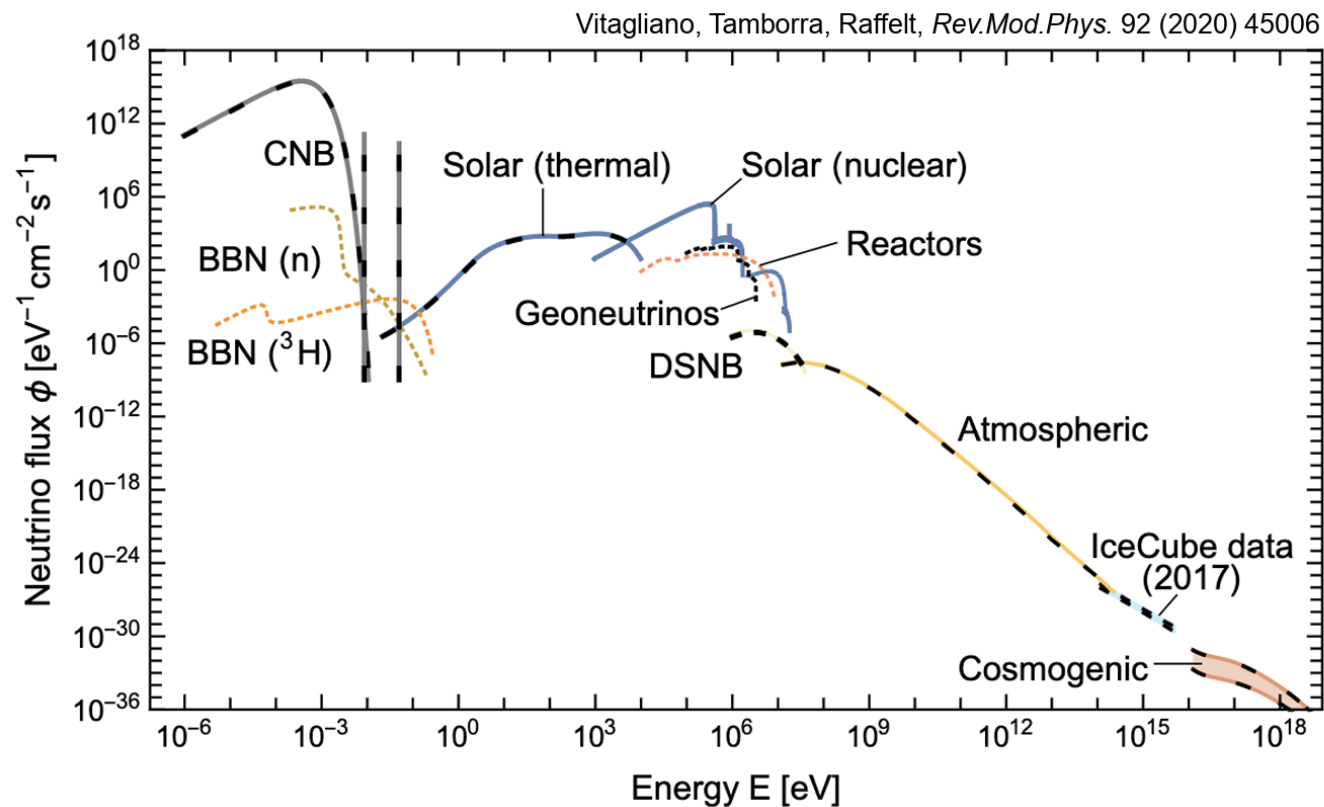
En la Tierra, recibimos aproximadamente:
1 neutrino cósmico por cm² cada varios cientos de años.

$$\Phi_\nu \approx 10^{-10} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1} \sim 3 \times 10^{-3} \text{ cm}^{-2} \text{ y}^{-1}$$

FUENTES DE NEUTRINOS

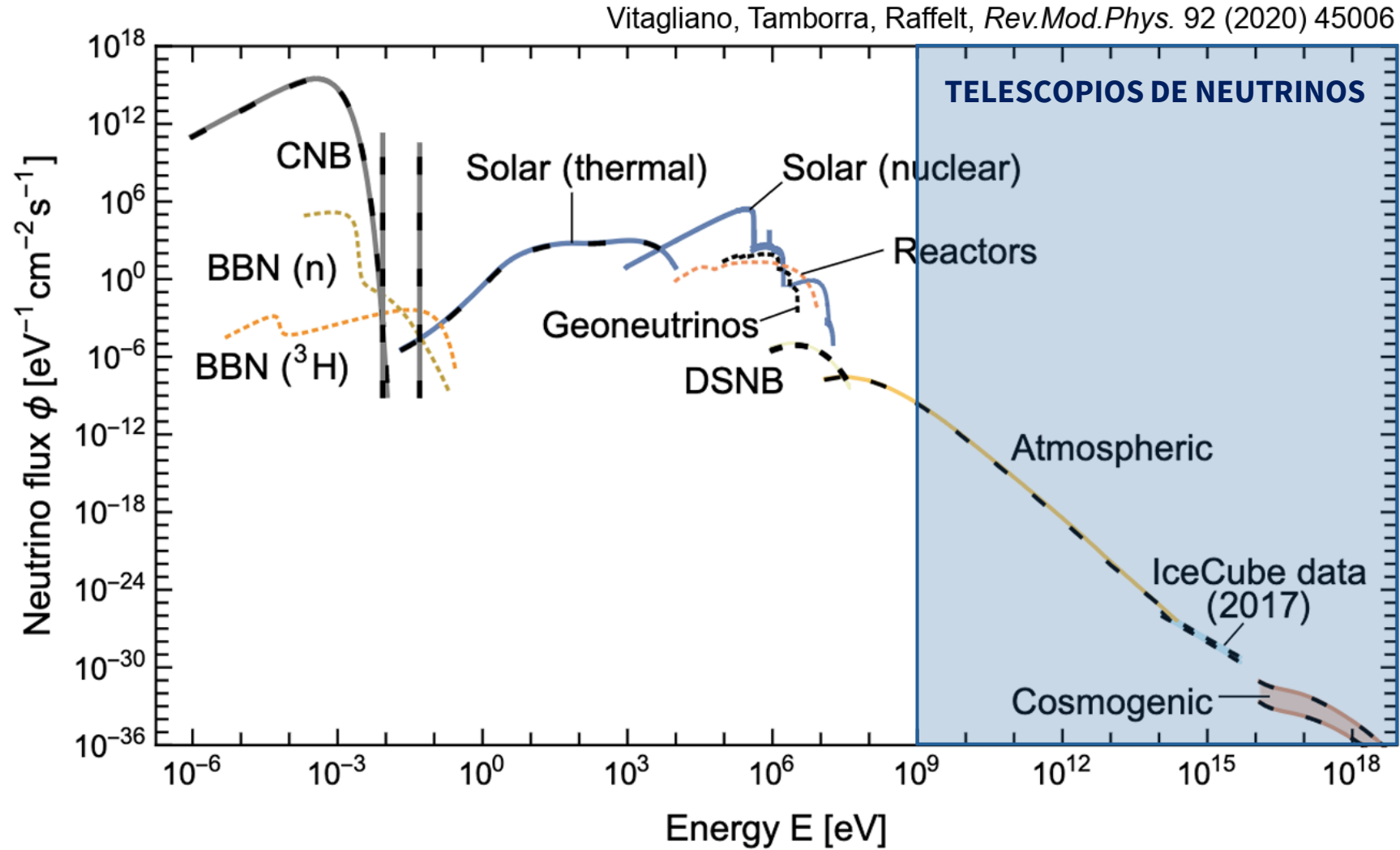
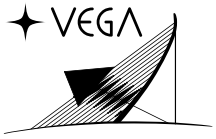


- **Fondo cósmico** de neutrinos (CNB)
- Neutrinos **solares**
- **Geoneutrinos**
- Neutrinos de **reactores nucleares**
- Neutrinos de **supernova**
- Neutrinos **atmosféricos**
- Neutrinos **cósmicos** (AGN, GRBs, etc.)
- Neutrinos **cosmogénicos**

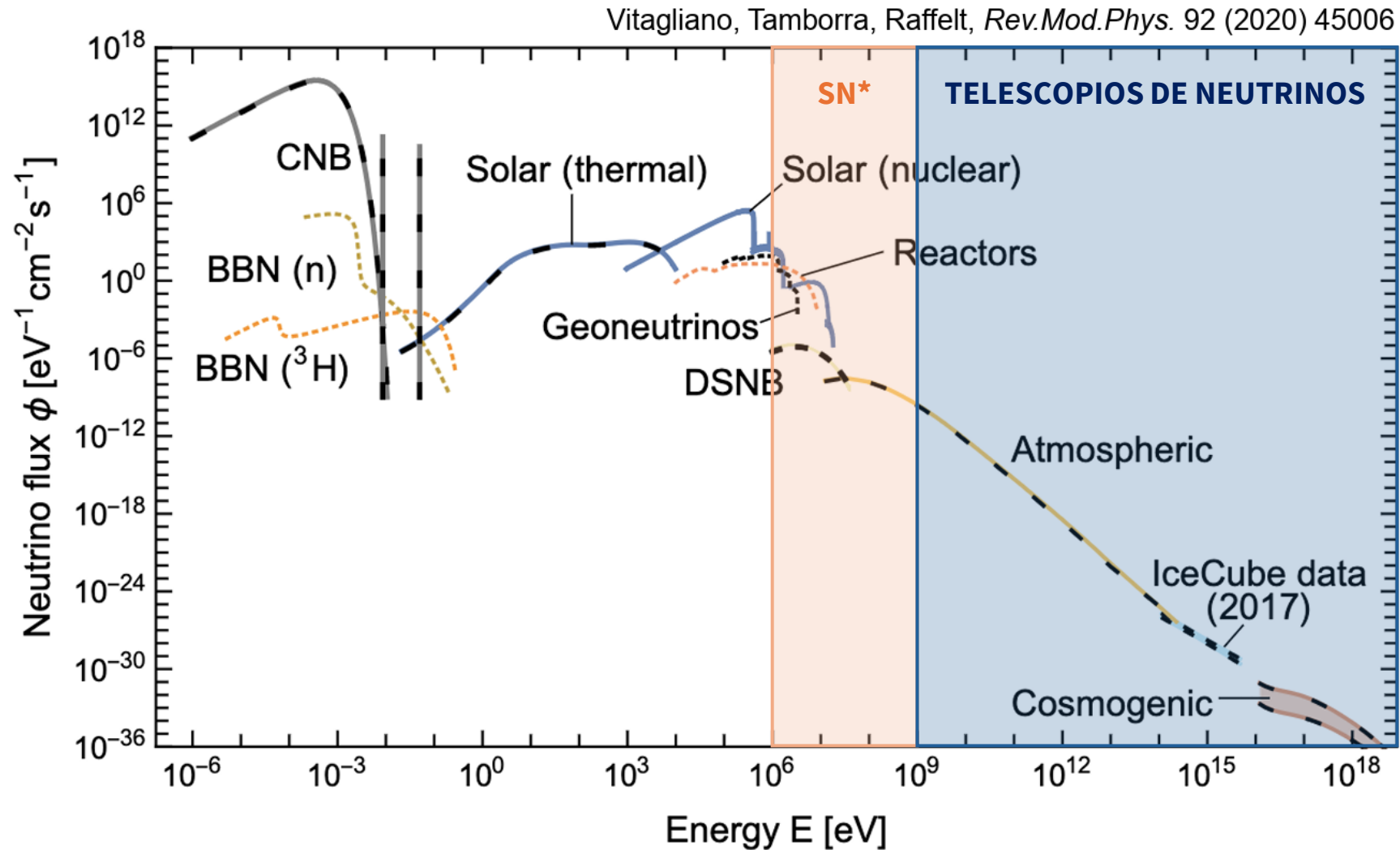
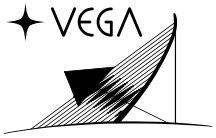


Grand Unified Neutrino Spectrum. El espectro de neutrinos en la Tierra de todas las fuentes posibles.

FUENTES DE NEUTRINOS



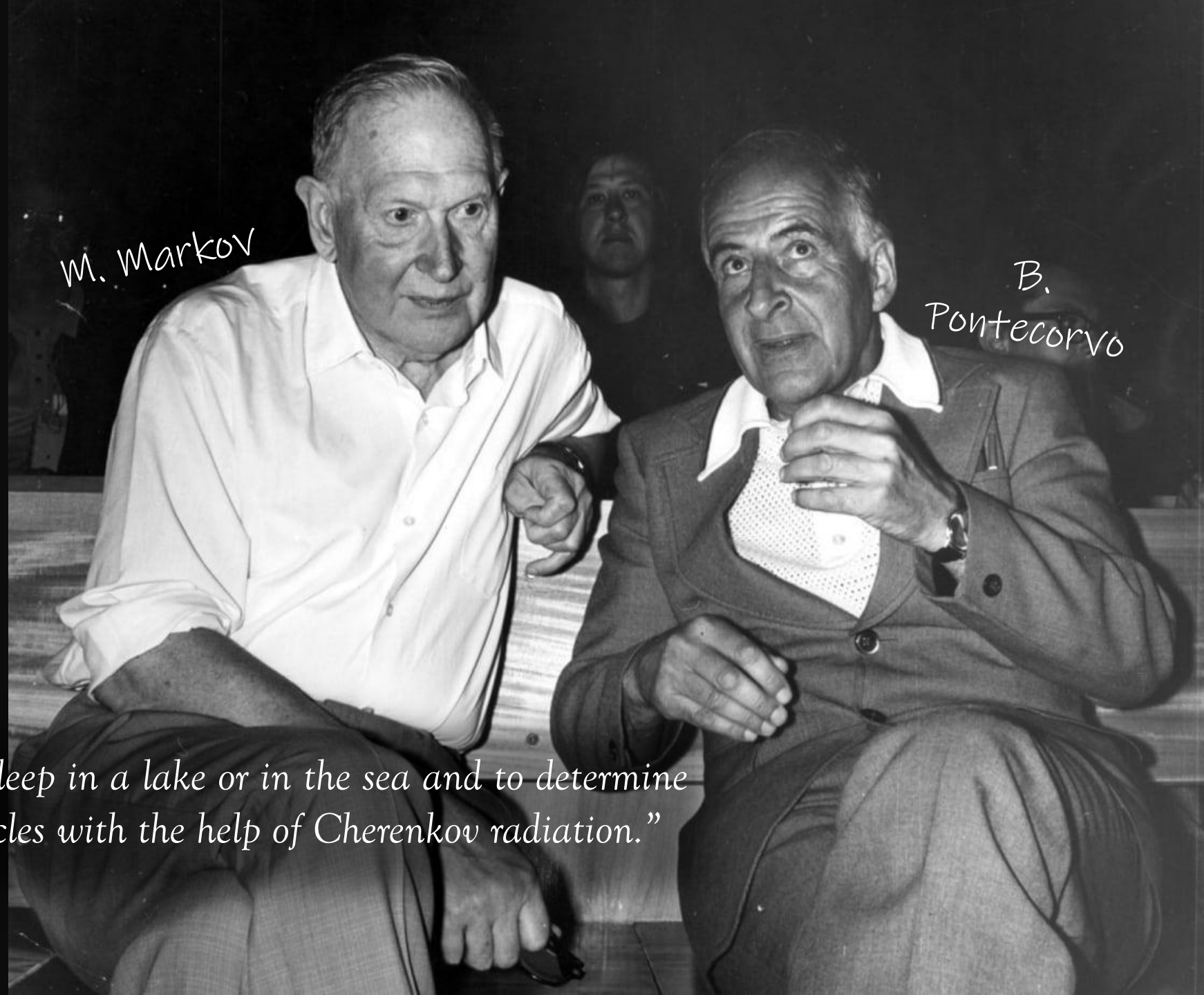
FUENTES DE NEUTRINOS





3. PRINCIPIO DE DETECCIÓN

LA IDEA



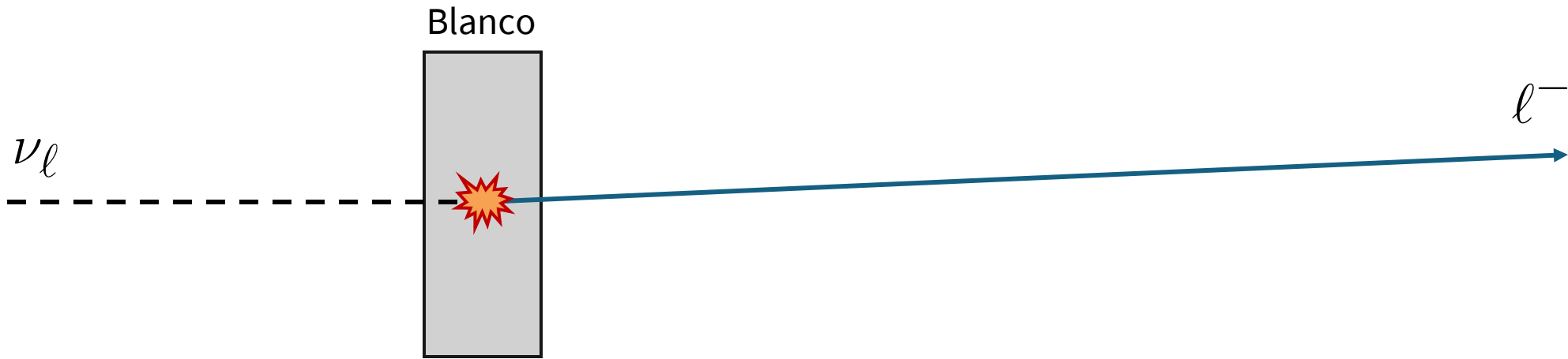
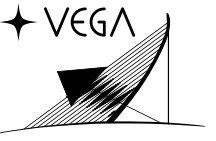
M. Markov

B.
Pontecorvo

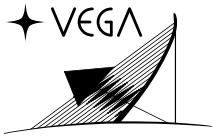
“We propose to install detectors deep in a lake or in the sea and to determine the direction of the charged particles with the help of Cherenkov radiation.”

M. Markov (1960)

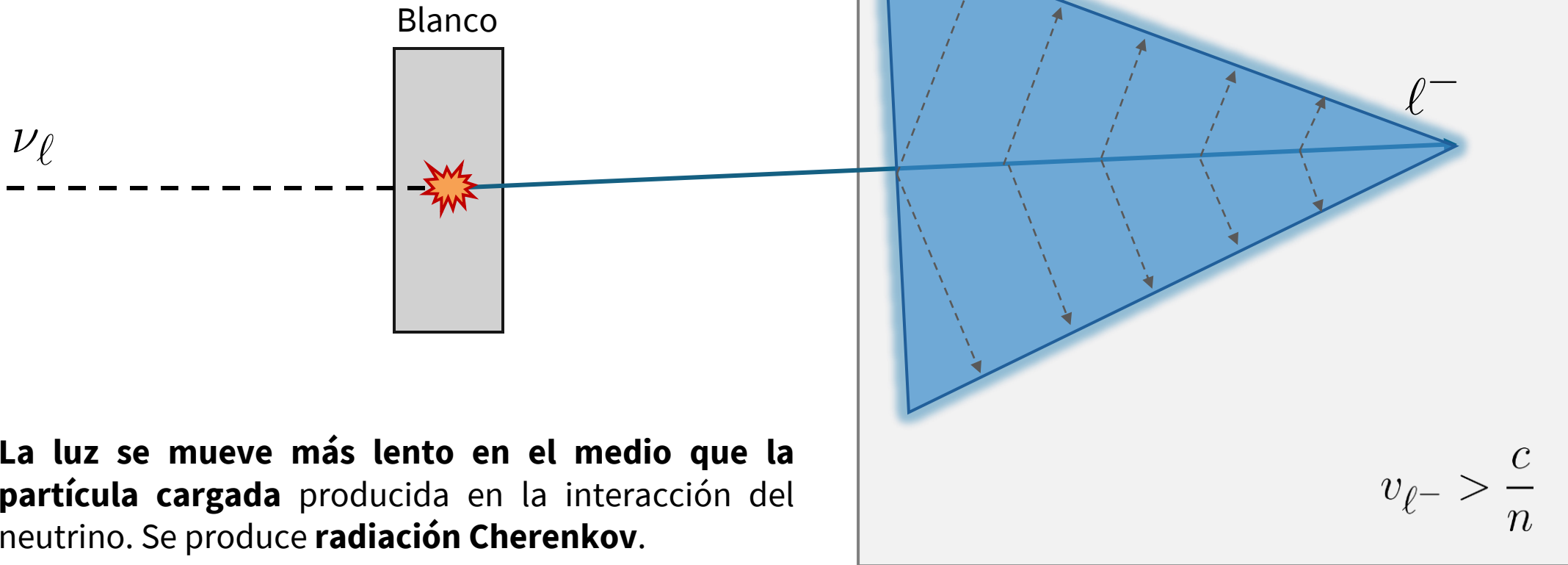
LA IDEA



LA IDEA

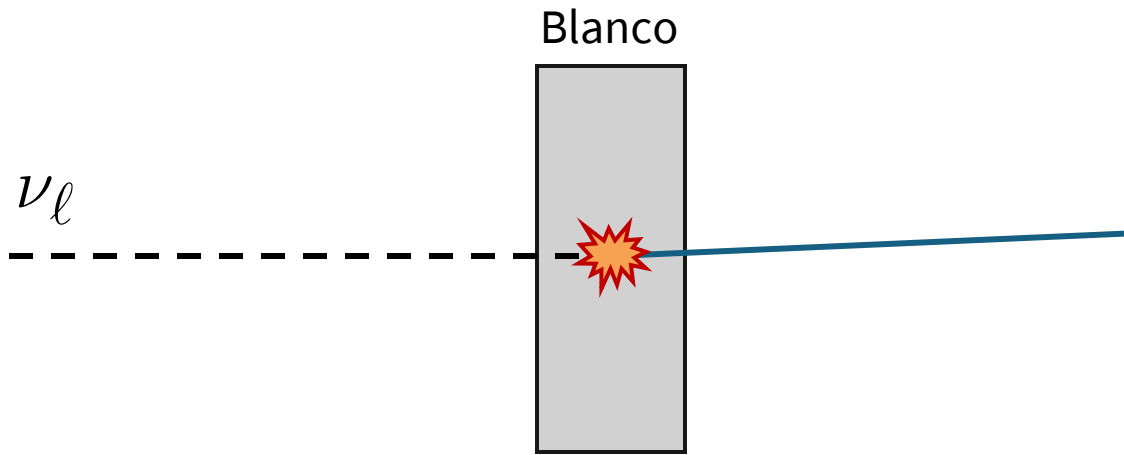


Medio con índice de refracción $n > 1$



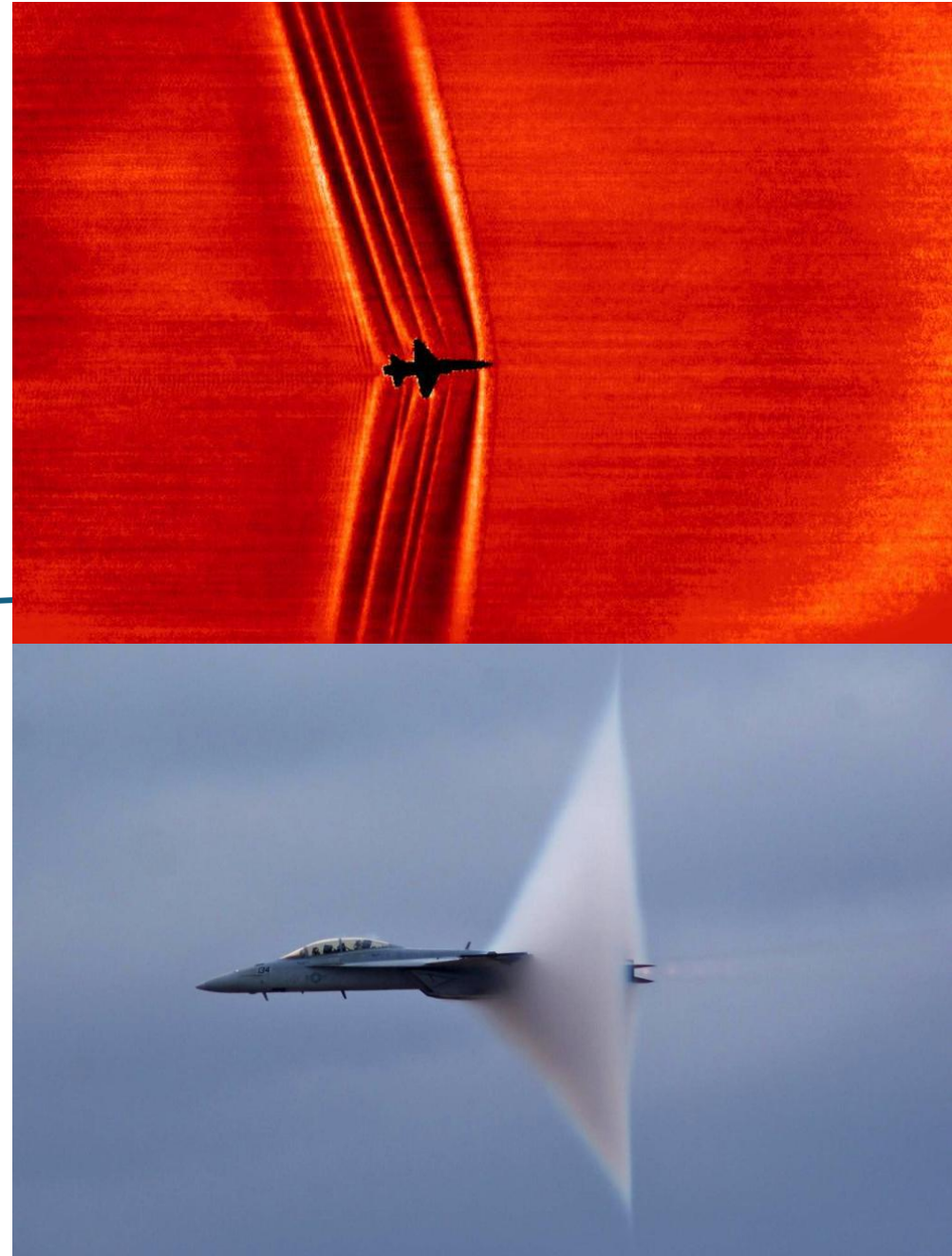
La luz se mueve más lento en el medio que la **partícula cargada** producida en la interacción del neutrino. Se produce **radiación Cherenkov**.

LA IDEA

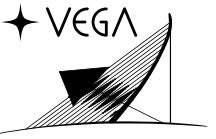


La luz se mueve más lento en el medio que la **partícula cargada** producida en la interacción del neutrino. Se produce **radiación Cherenkov**.

Interferencia constructiva en un frente de onda. Fenómeno análogo a romper la barrera del sonido.

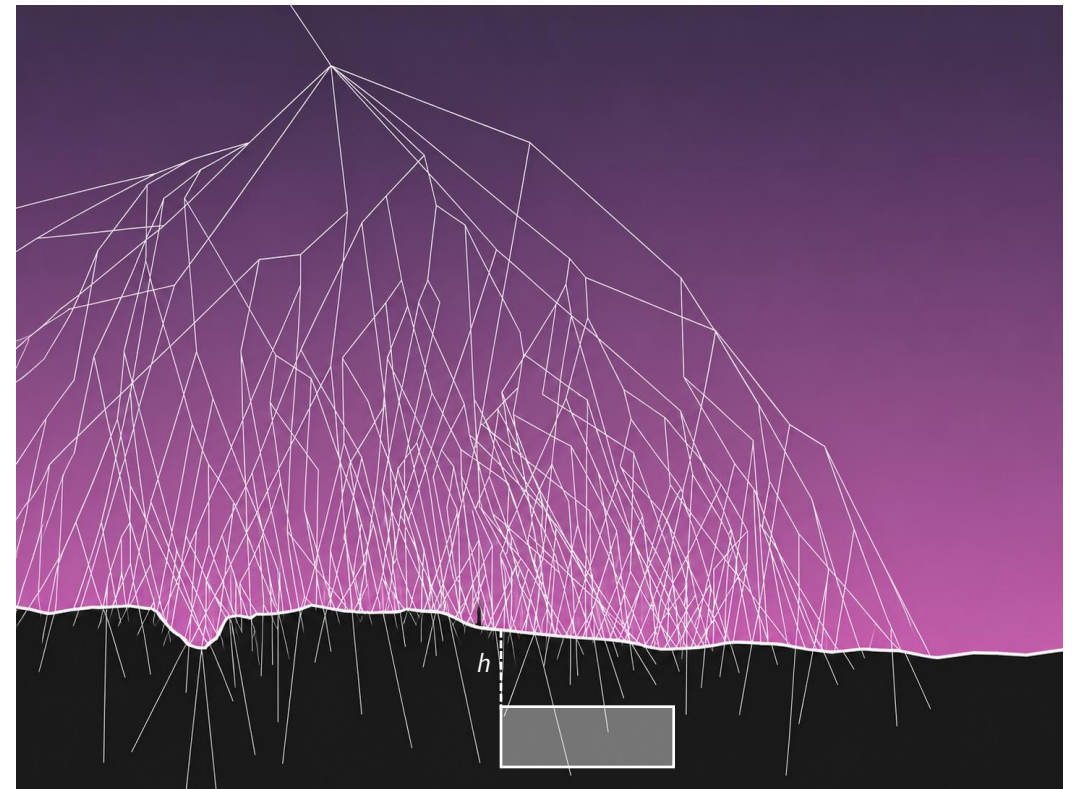
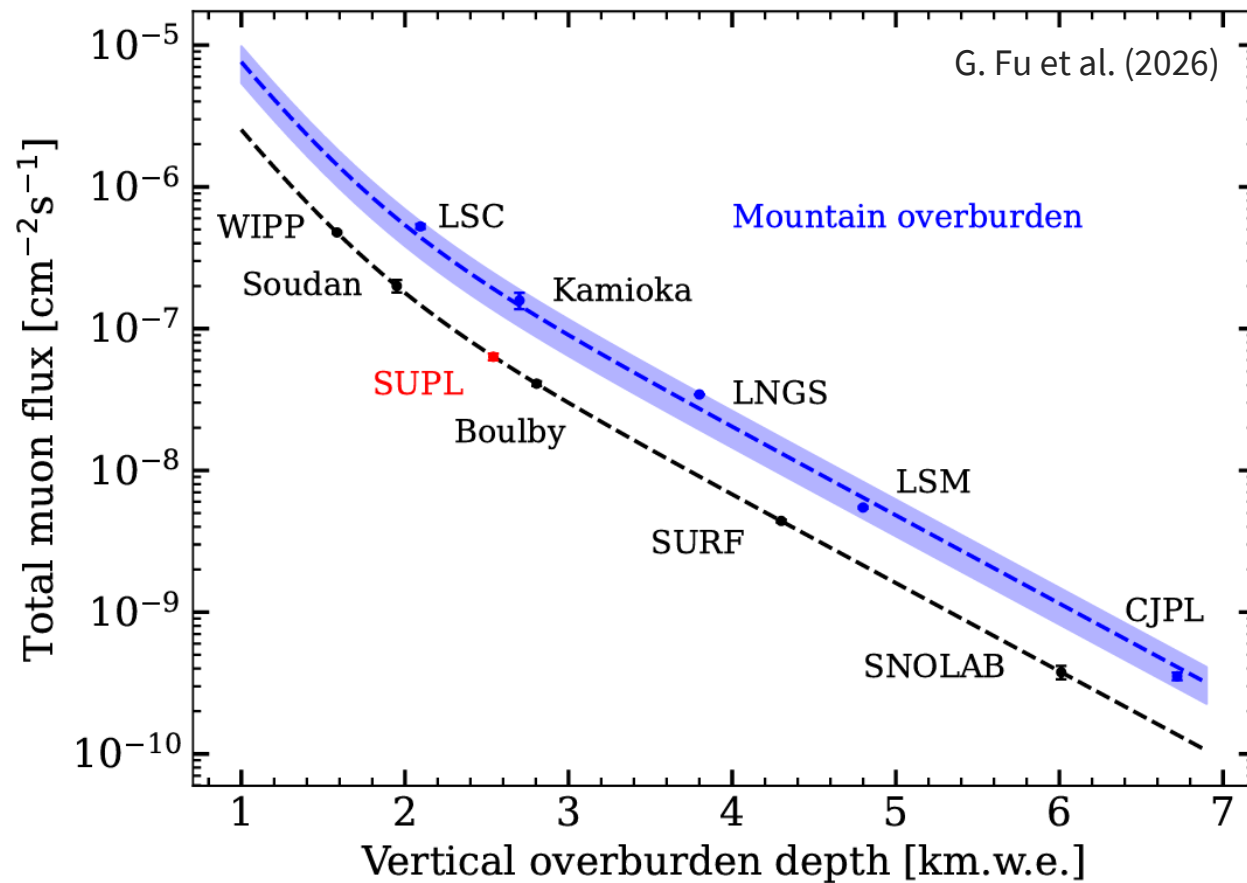


LA RECETA

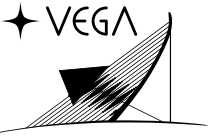


1. Situar el detector a gran profundidad.

El material funcionará como blindaje frente al fondo de muones atmosféricos.

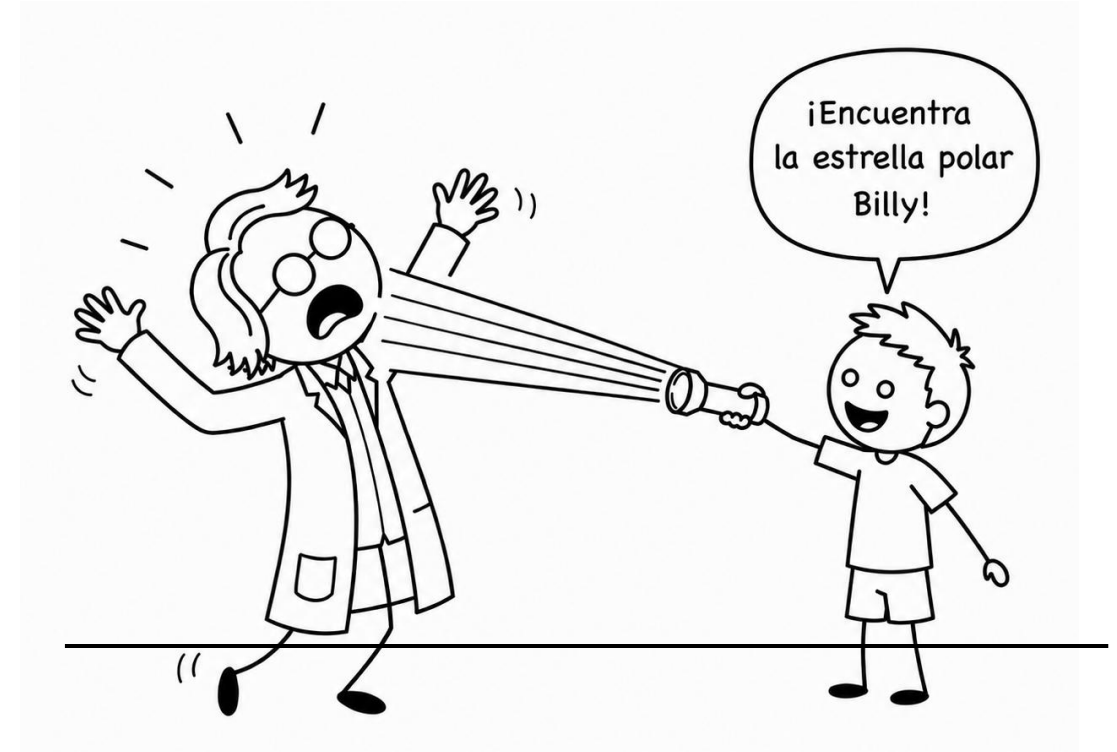
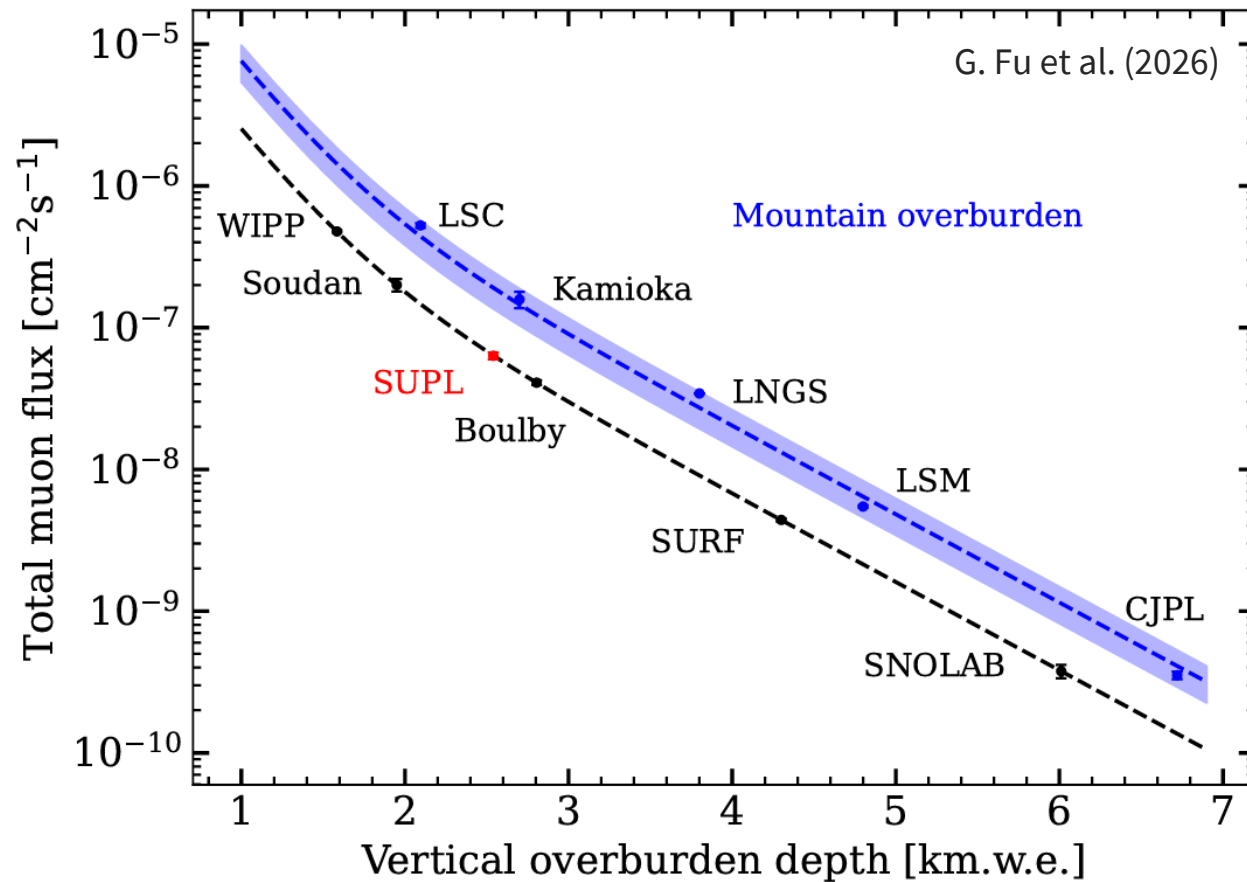


LA RECETA

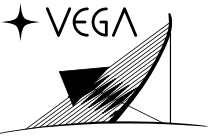


1. Situar el detector a gran profundidad.

El material funcionará como blindaje frente al fondo de muones atmosféricos.

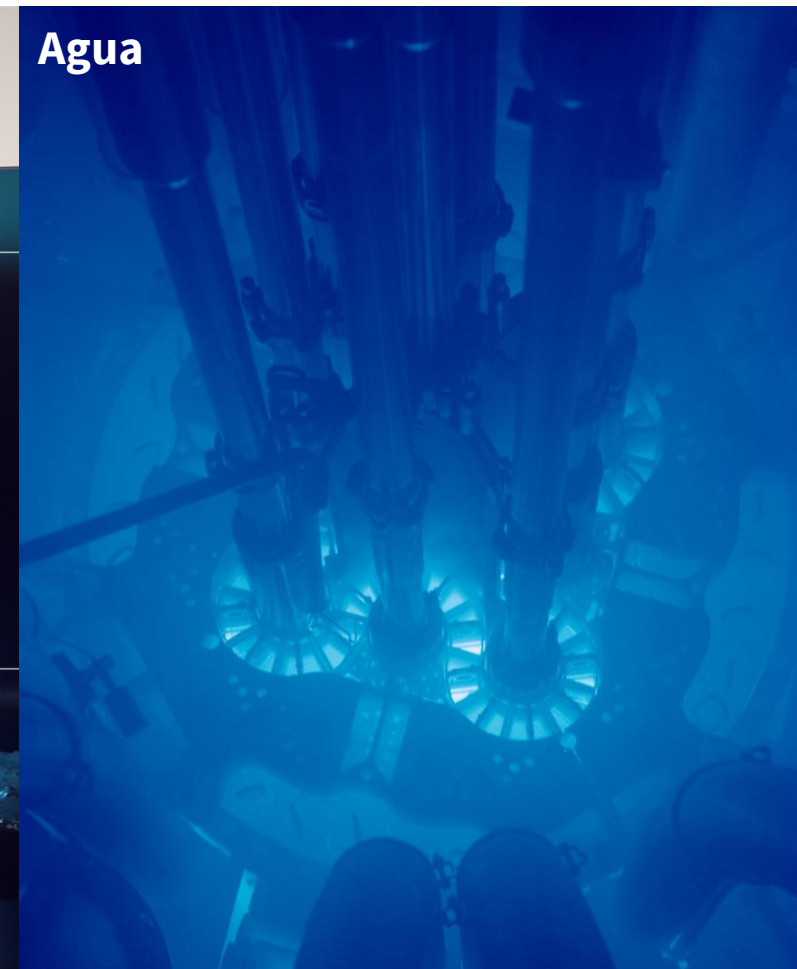
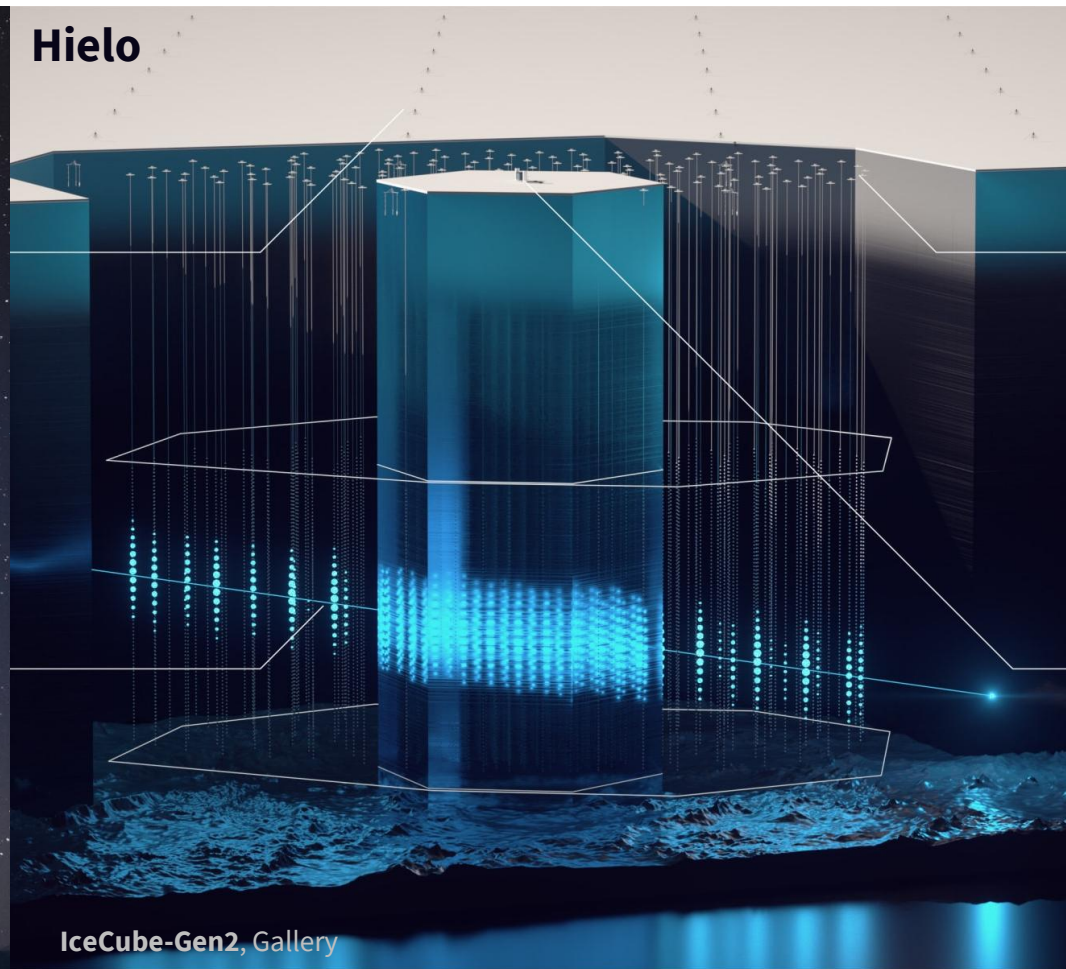


LA RECETA



2. Usar un medio transparente.

Esto permitirá la propagación y detección de la radiación Cherenkov.

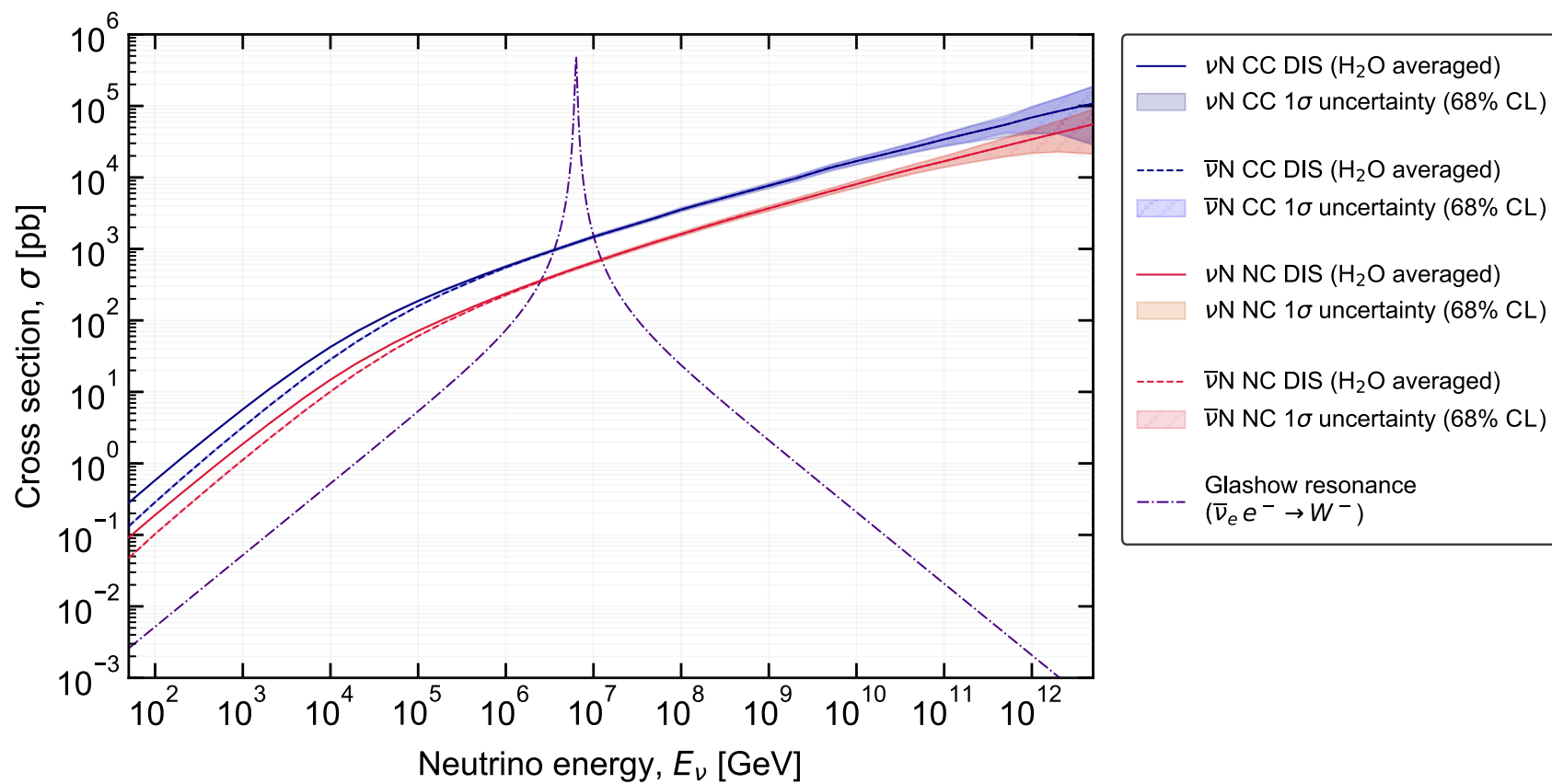


LA RECETA

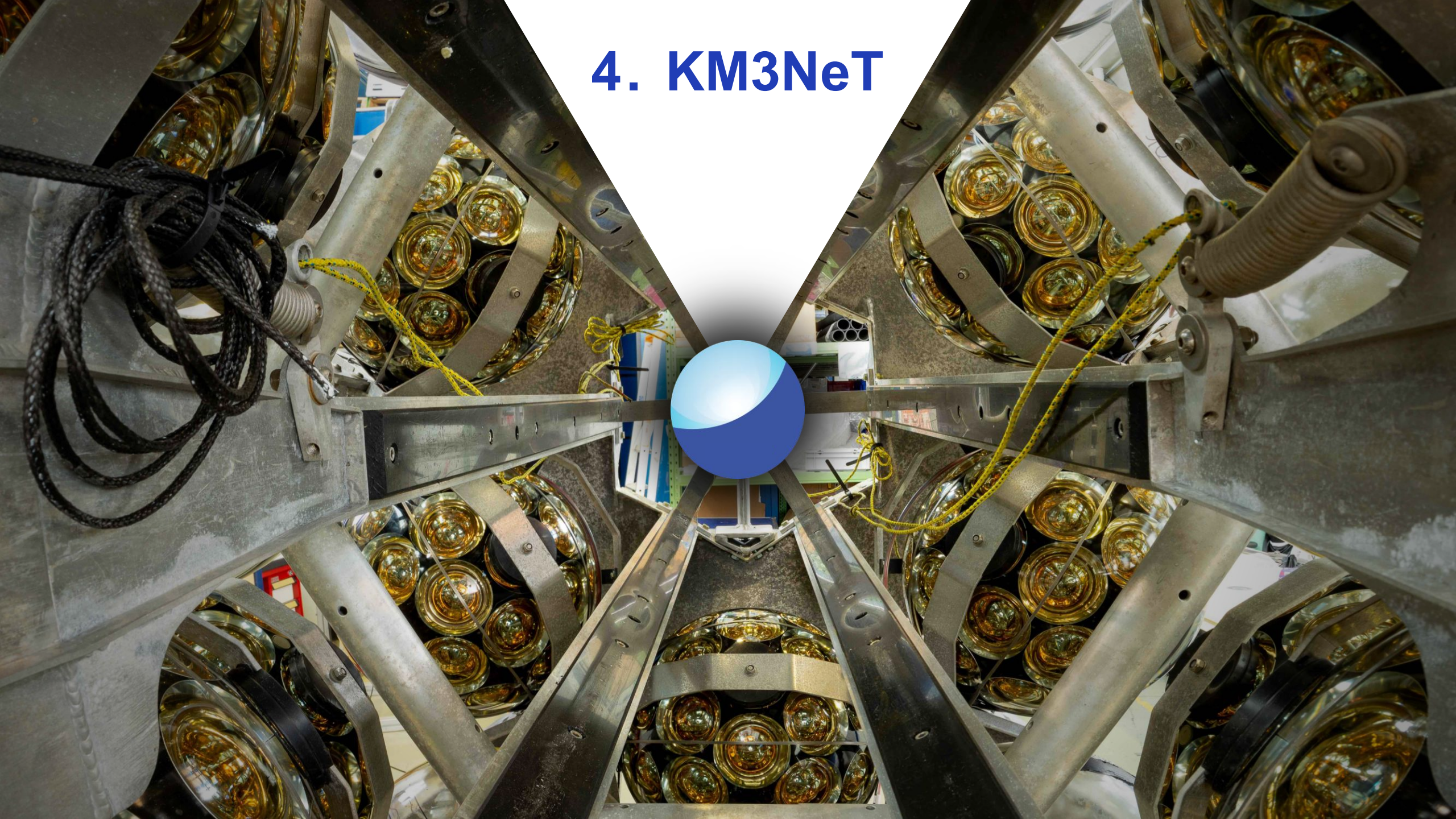


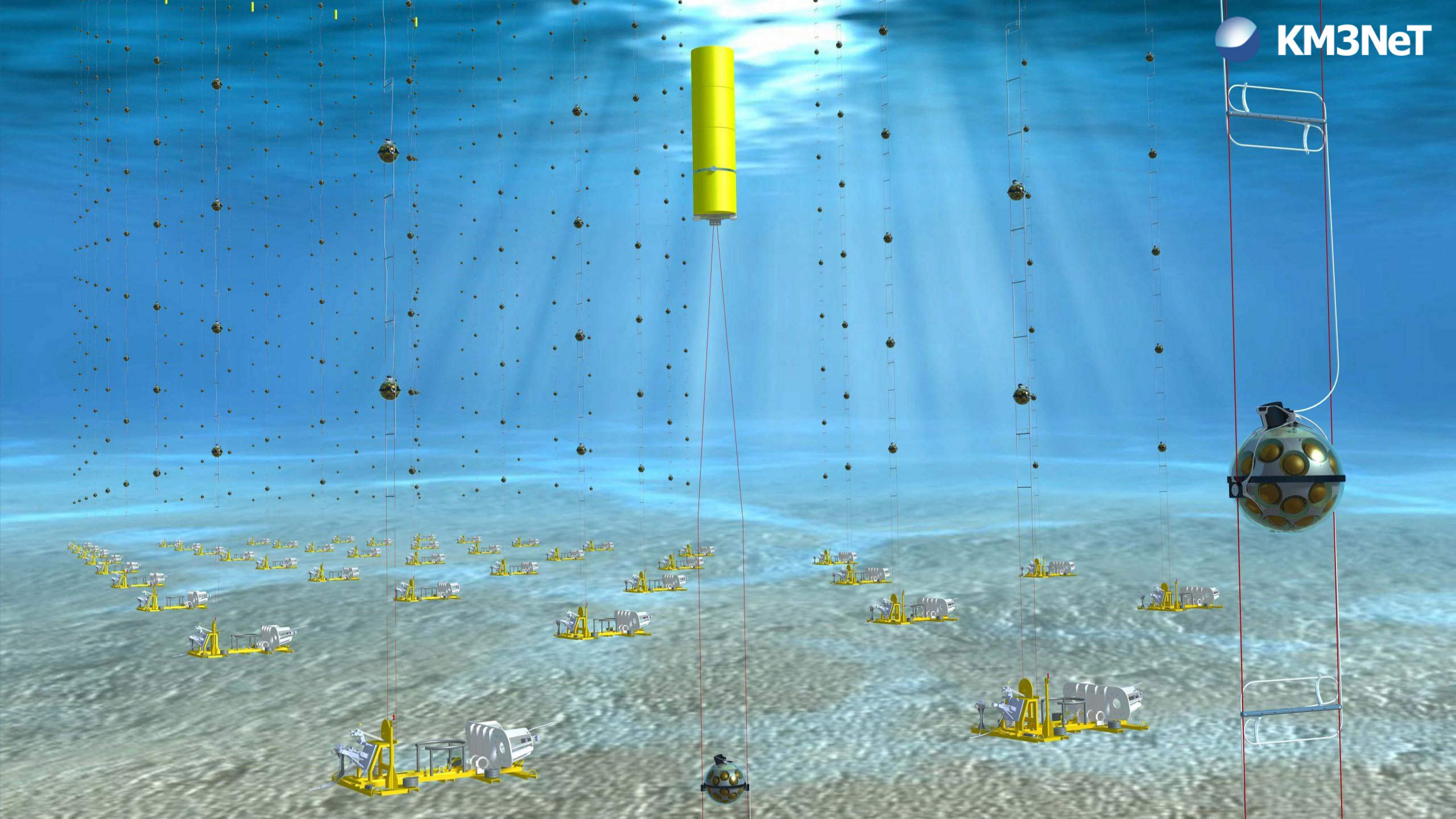
3. Instrumentar un volumen lo más grande posible.

Así compensaremos el bajo flujo de neutrinos y su pequeña sección eficaz de interacción.



4. KM3NeT

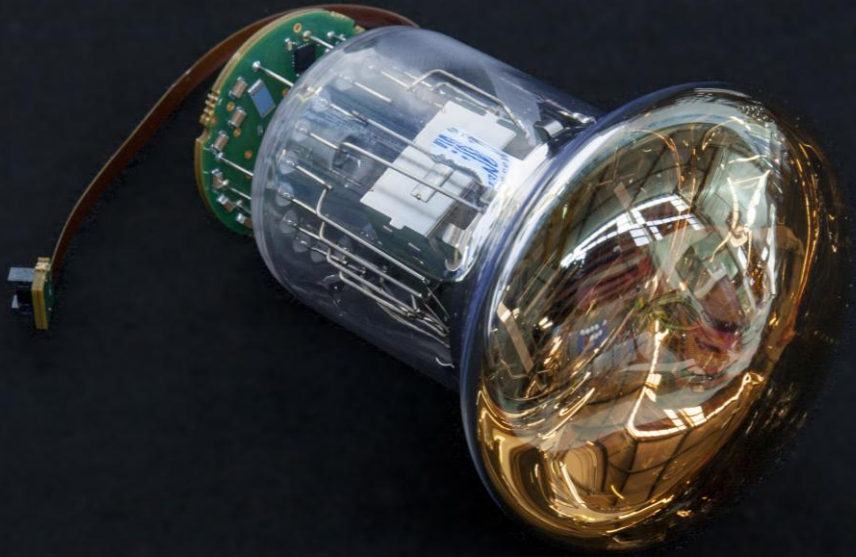


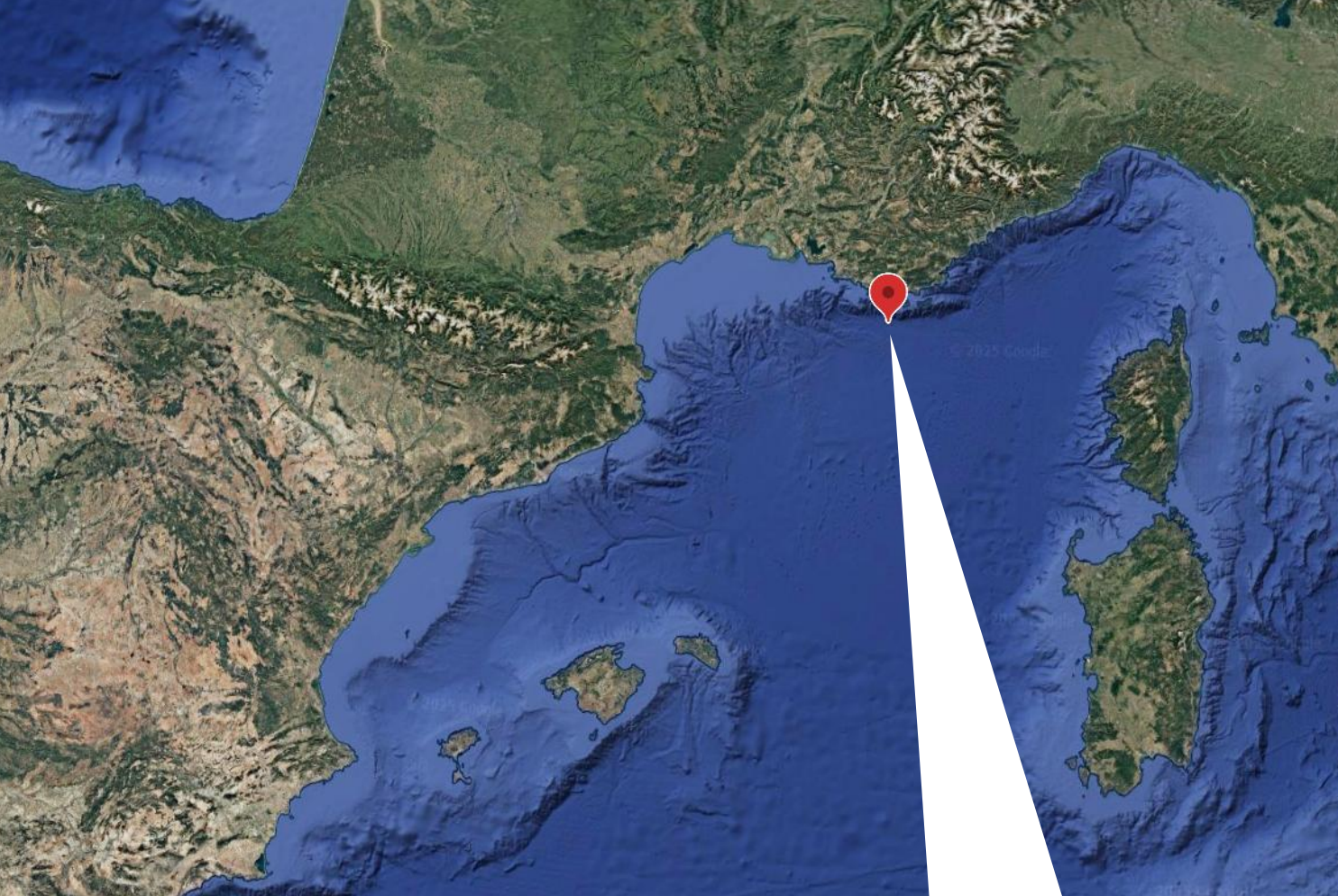


Módulos Ópticos Digitales (DOMs)



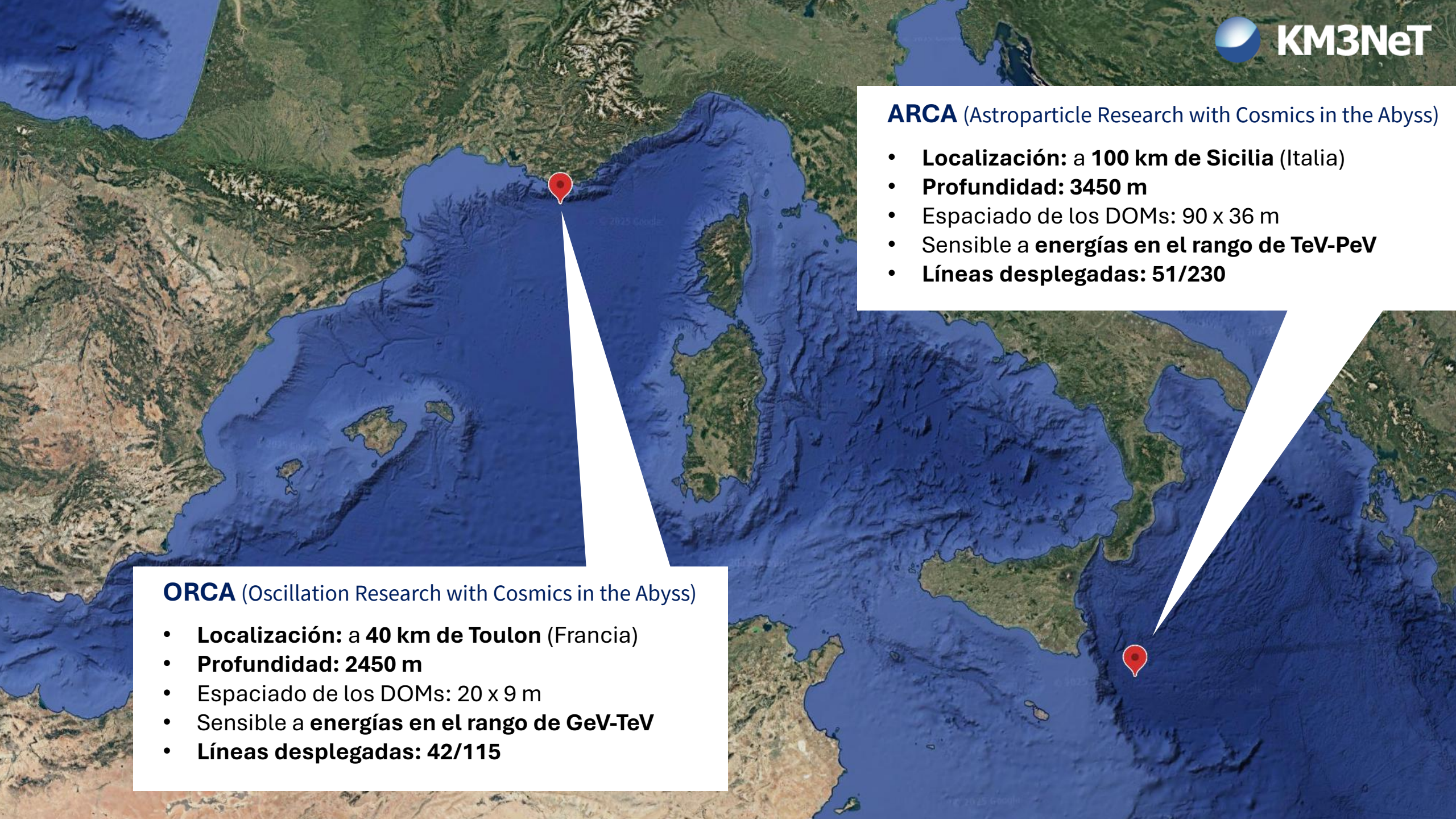
Tubos Fotomultiplicadores (PMTs)





ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss)

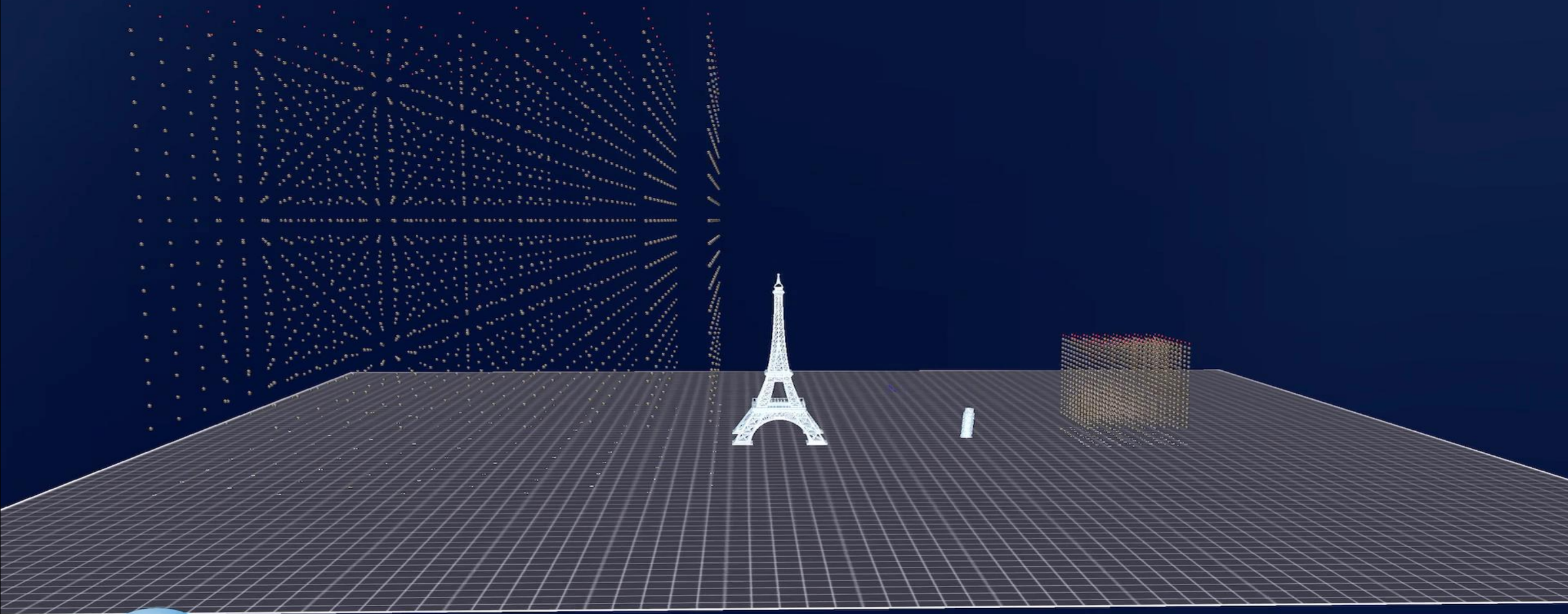
- **Localización:** a 100 km de Sicilia (Italia)
- **Profundidad:** 3450 m
- Espaciado de los DOMs: 90 x 36 m
- Sensible a **energías en el rango de TeV-PeV**
- **Líneas desplegadas:** 51/230



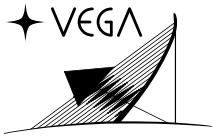
ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss)

- **Localización:** a 40 km de Toulon (Francia)
- **Profundidad:** 2450 m
- Espaciado de los DOMs: 20 x 9 m
- Sensible a **energías en el rango de GeV-TeV**
- **Líneas desplegadas:** 42/115

182 ns



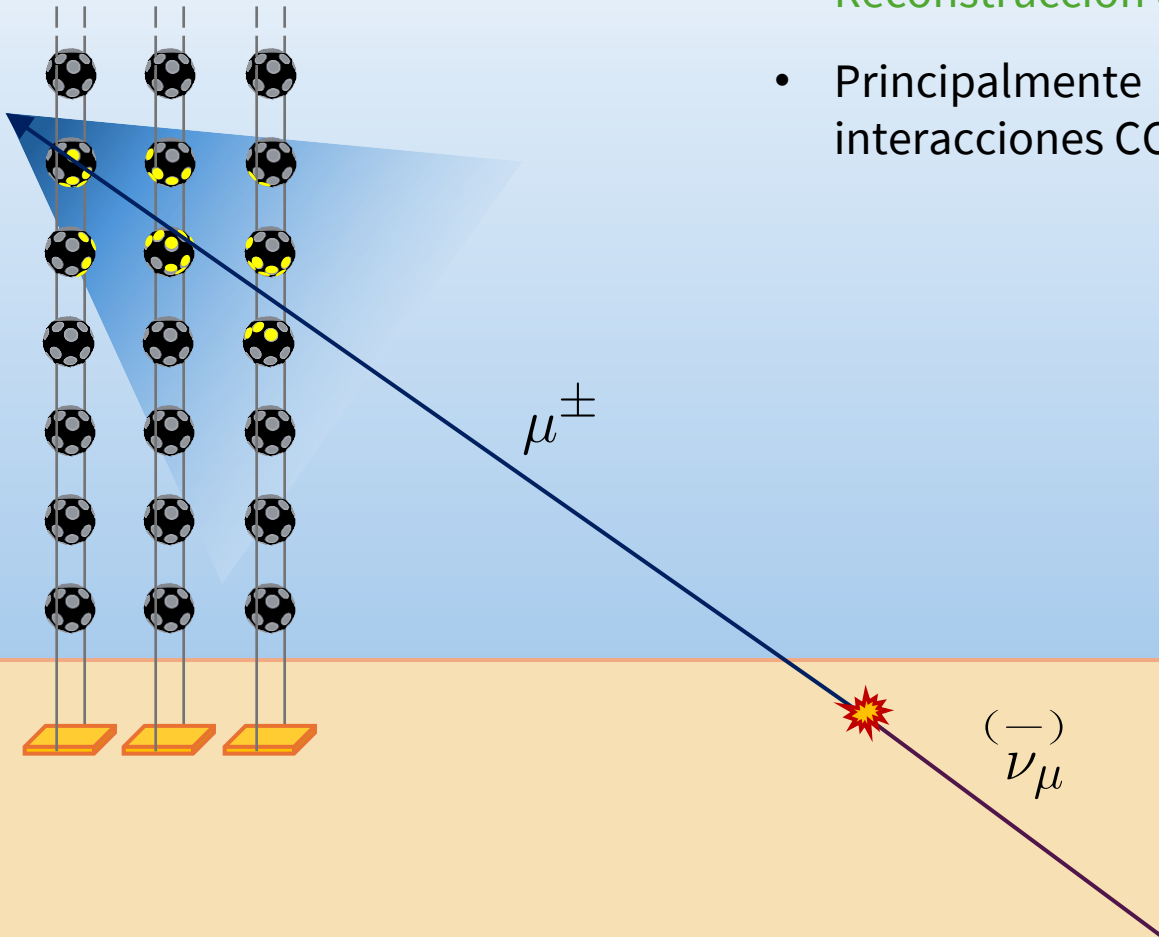
CLASIFICACIÓN DE EVENTOS DE NEUTRINOS



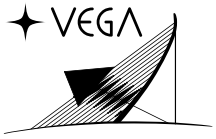
Los eventos medidos en el detector pueden clasificarse en **dos categorías**: trazas (**tracks**) y cascadas (**showers**).

Tracks

- Reconstrucción **direccional buena**.
- Principalmente producidos en interacciones CC ν_μ .



CLASIFICACIÓN DE EVENTOS DE NEUTRINOS



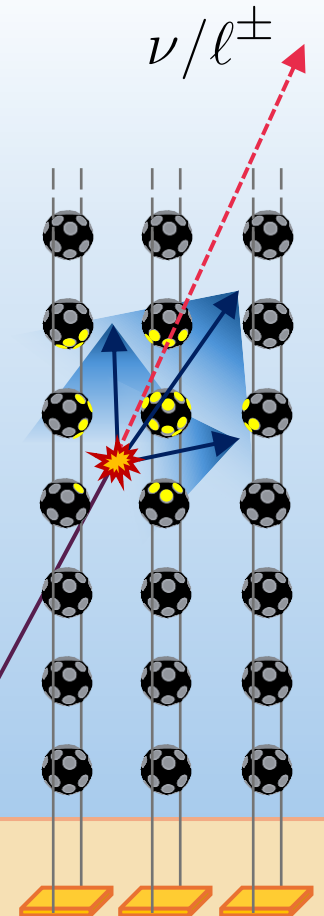
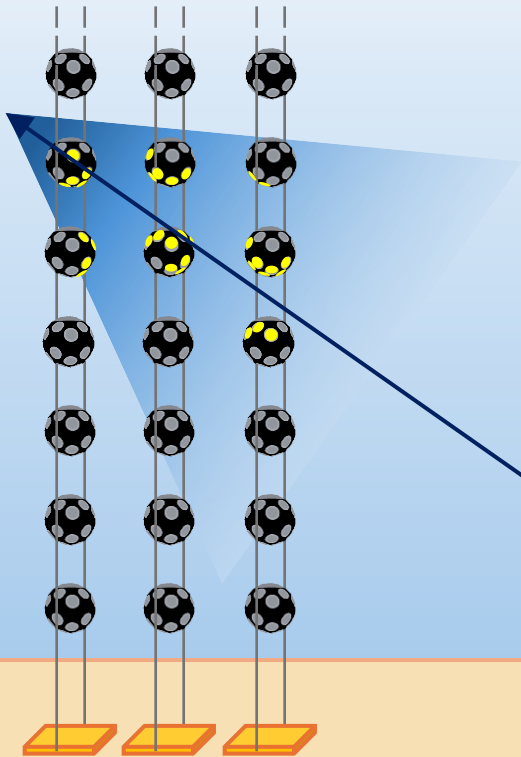
Los eventos medidos en el detector pueden clasificarse en **dos categorías**: trazas (**tracks**) y cascadas (**showers**).

Tracks

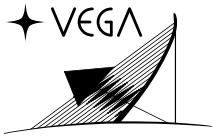
- Reconstrucción **direccional buena**.
- Principalmente producidos en interacciones CC ν_μ .

Showers

- Reconstrucción **energética buena**.
- Principalmente producidos en interacciones CC ν_e + all flavour NC.



EVENTOS DE FONDO ATMOSFÉRICO



Existen **dos fuentes** principales **de fondo** para la detección de neutrinos cósmicos.

Muones atmosféricos

- Producen “**down-going tracks**”.
- Conforman la mayoría de los eventos reconstruidos.

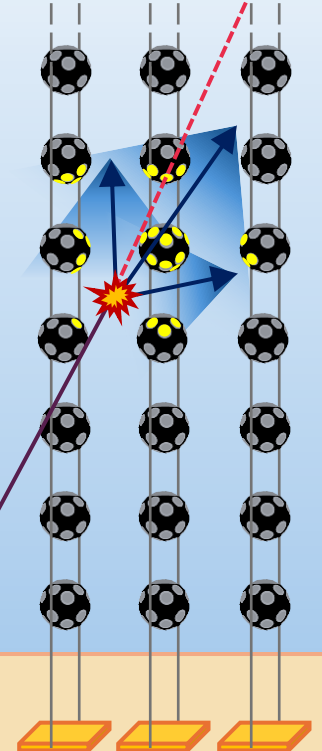
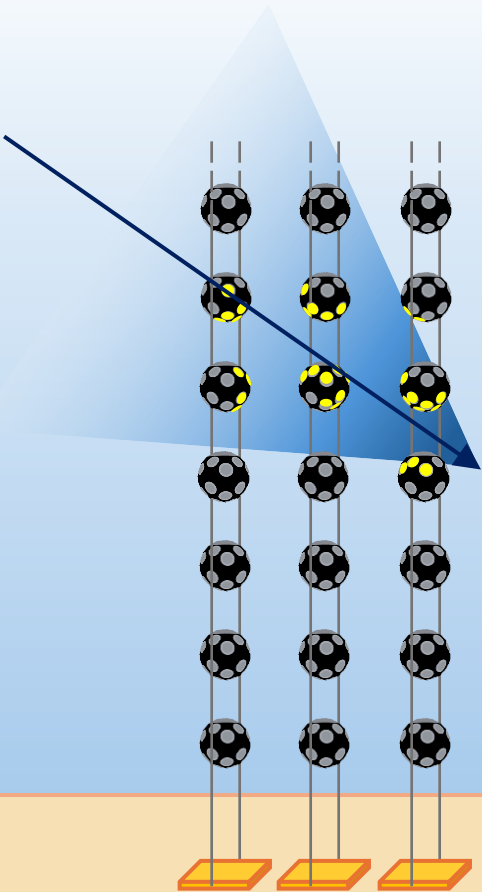
$\mu^\pm$

Neutrinos atmosféricos

- **Fondo irreducible.**
- Distribuidos de forma aprox. isótropa en el cielo.

$(-)\nu_\ell$

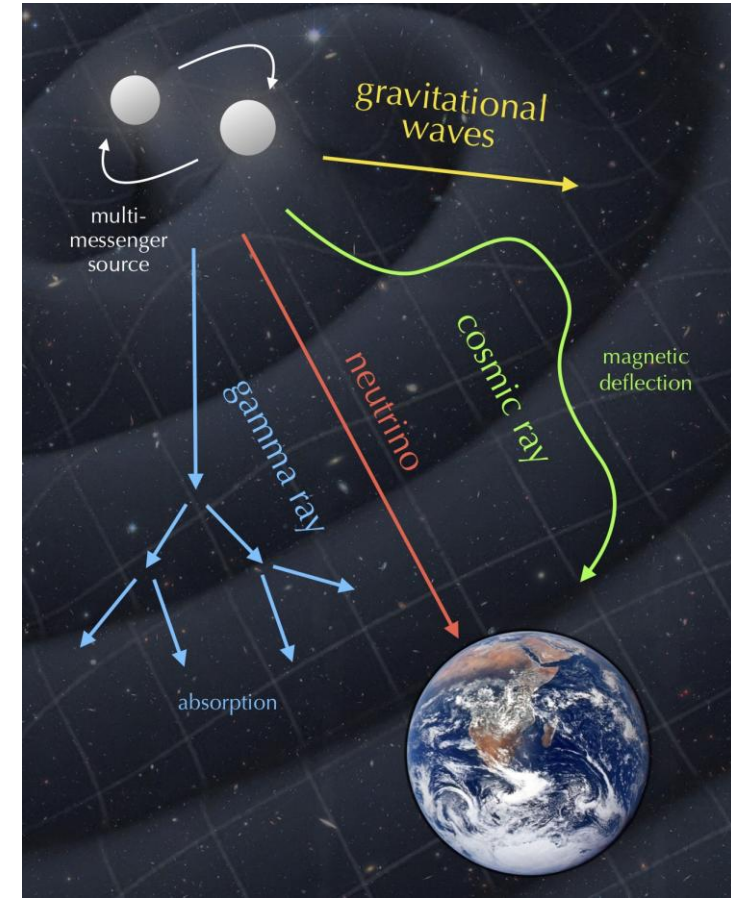
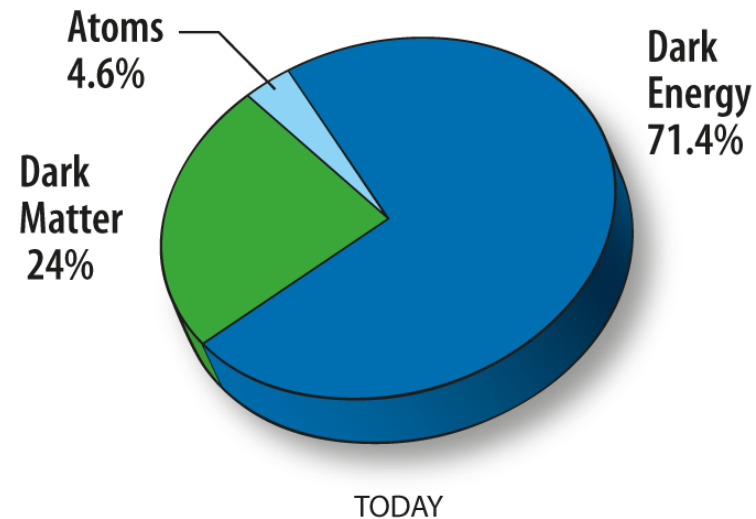
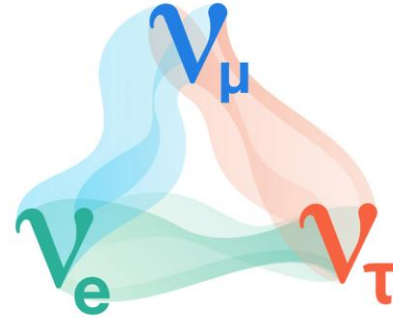
$\nu/\ell^\pm$



UN EXPERIMENTO POLIVALENTE

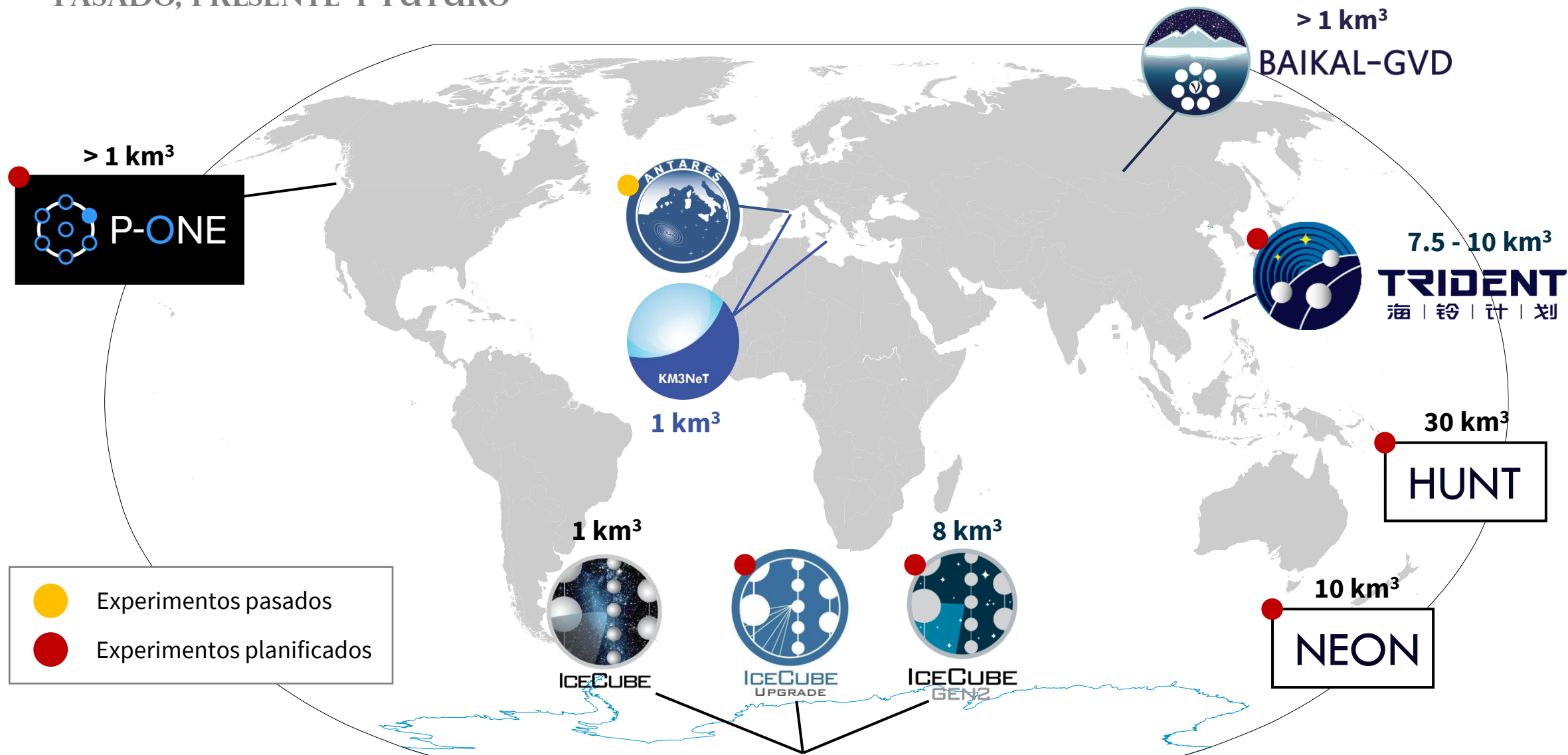
Los **telescopios de neutrinos**, y en particular KM3NeT, nos permiten hacer **mucha física** diferente:

- **Astronomía multimensajero**
- Búsquedas indirectas de **materia oscura**
- **Propiedades de los neutrinos**
- Desarrollo de **IA**
- **Oceanografía** y física medioambiental
- Búsquedas de **física más allá del Modelo Estándar**

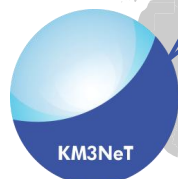


TELESCOPIOS DE NEUTRINOS EN EL MUNDO

PASADO, PRESENTE Y FUTURO



> 1 km³



1 km³

1 km³



ICECUBE



ICECUBE
UPGRADE



ICECUBE
GEN2

8 km³



> 1 km³
BAIKAL-GVD



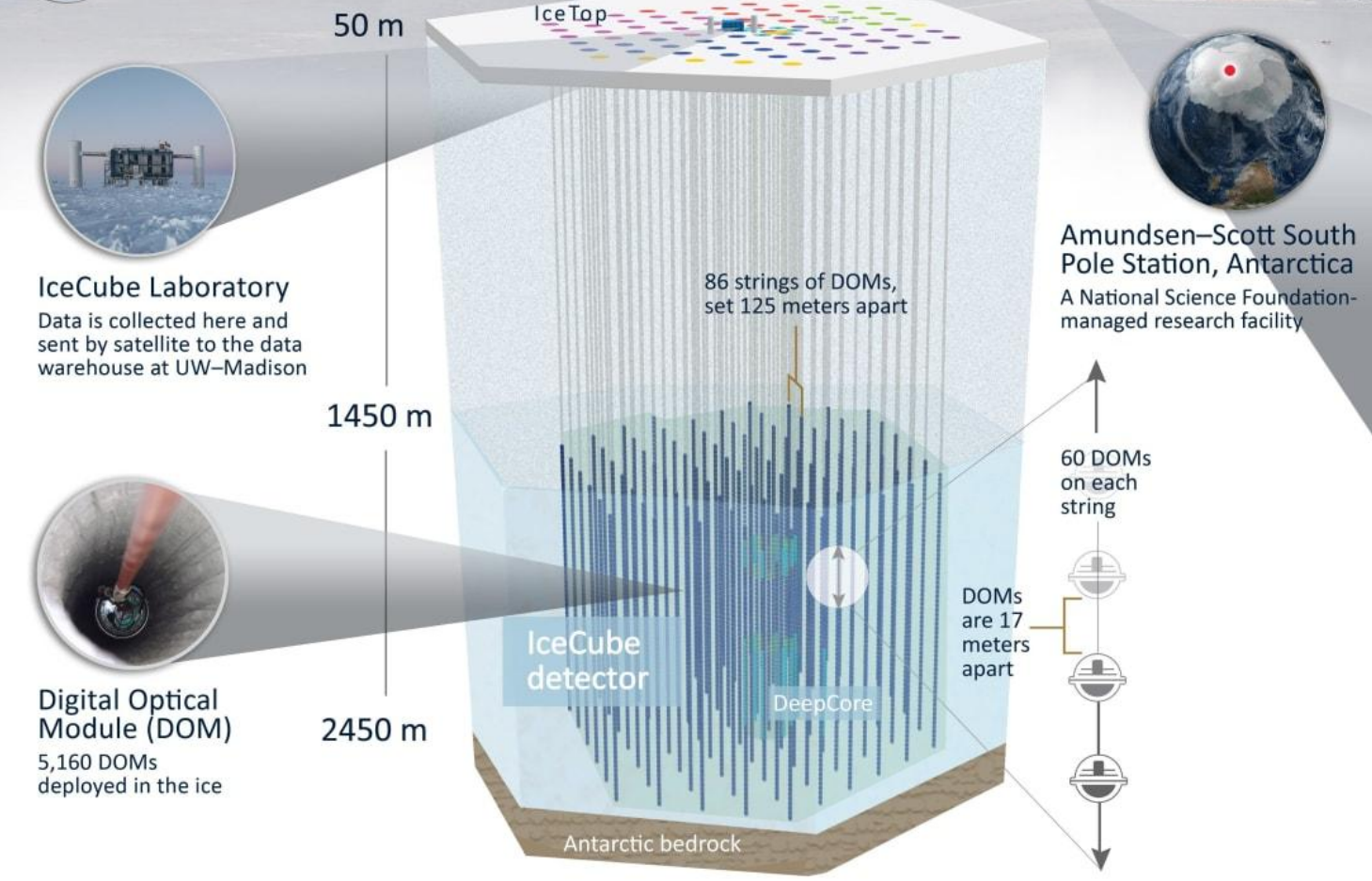
7.5 - 10 km³
TRIDENT
海 | 铃 | 计 | 划

30 km³

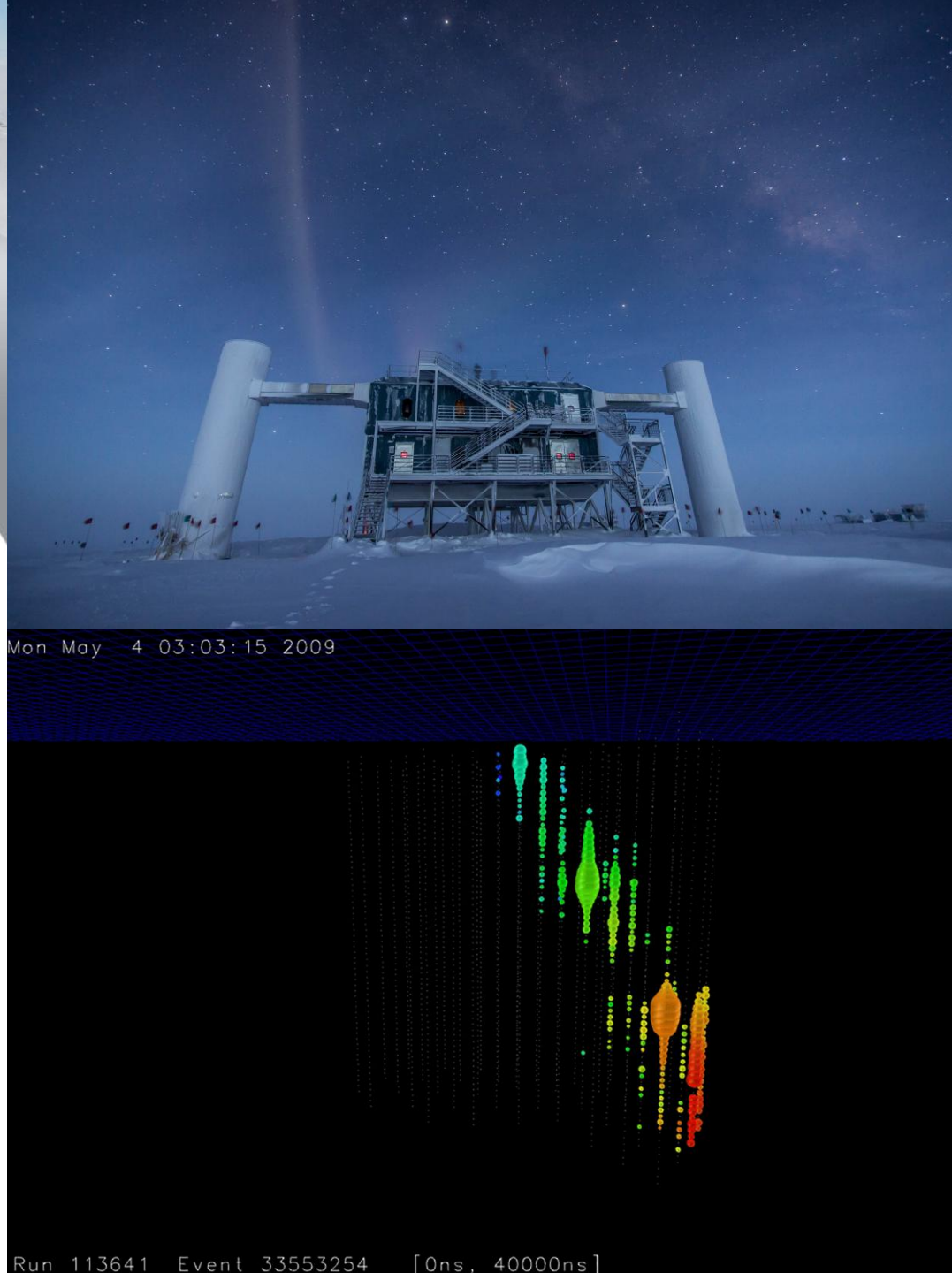
HUNT

10 km³

NEON



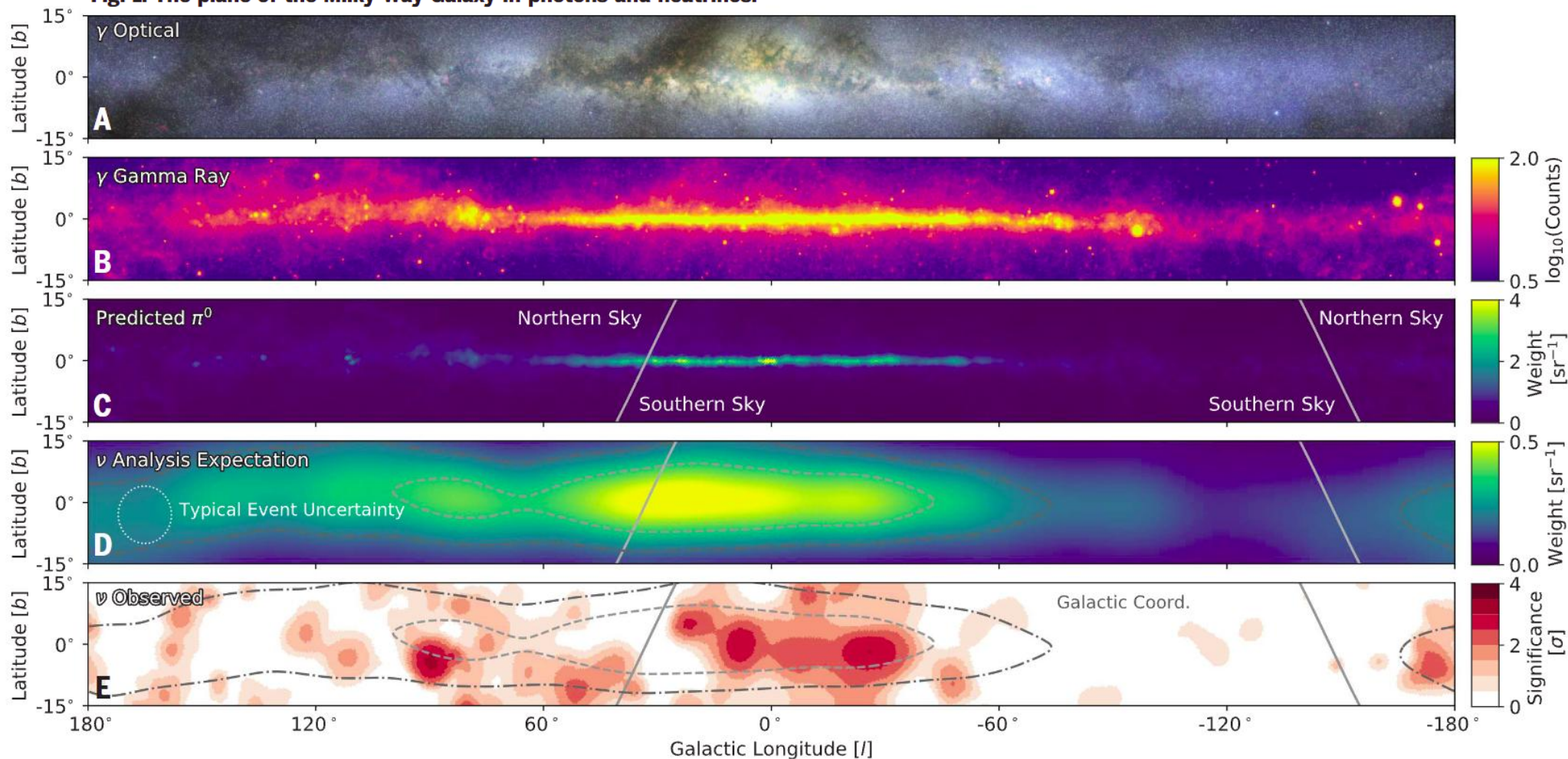
- **Descubrimiento del flujo difuso de neutrinos astrofísicos de alta energía (2013)**
- Identificación de **evidencias de fuentes extragalácticas** (TXS 0506+056 y NGC 1068)
- **Primera imagen de la Vía Láctea en neutrinos** y evidencia de emisión difusa del plano galáctico **(2023)**



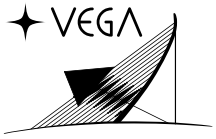
Observation of high-energy neutrinos from the Galactic plane

IceCube Collaboration^{*,†}

Fig. 1. The plane of the Milky Way Galaxy in photons and neutrinos.



KM3-230213A: UN SUCESO POCO COMÚN

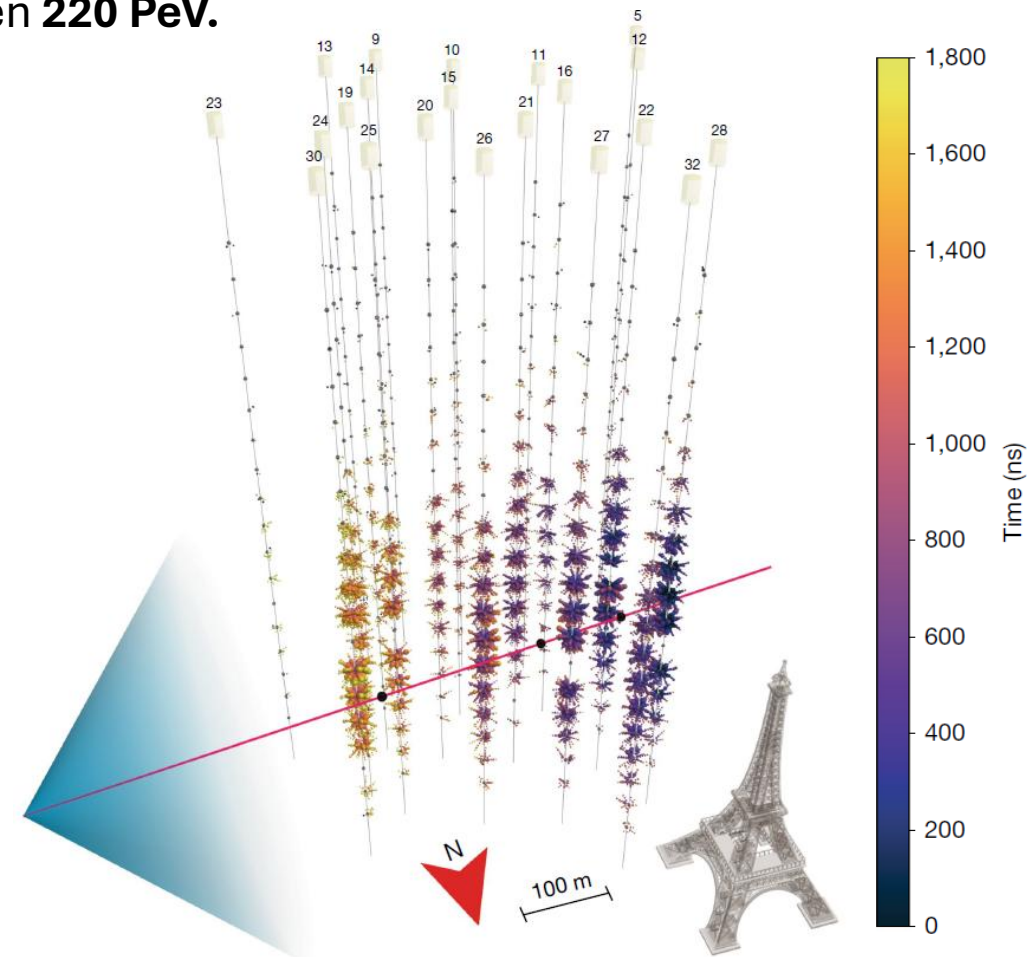
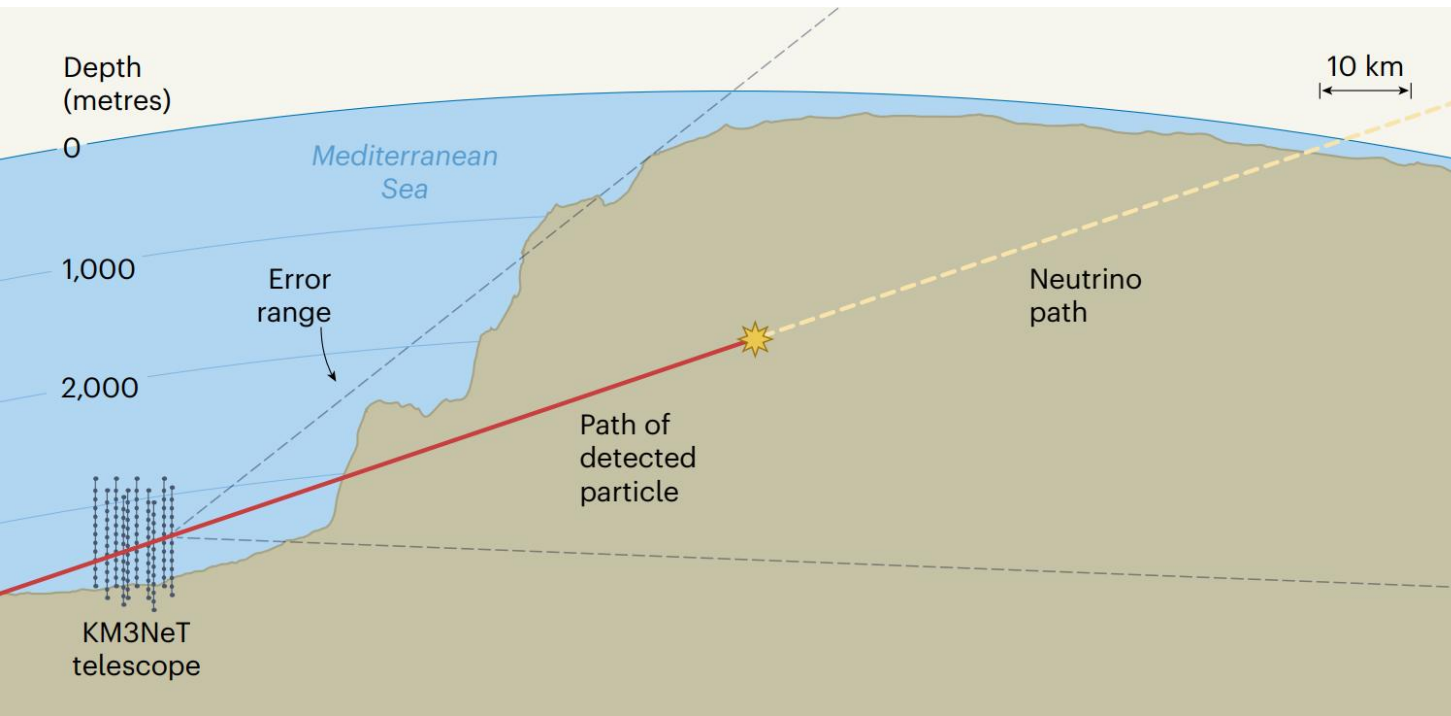


El **13 de febrero de 2023**, KM3NeT/ARCA en su configuración de **21 líneas** (10% del detector final), detectó el neutrino más energético jamás registrado hasta la fecha.

La energía del evento, bautizado como **KM3-230213A**, se estimó en **220 PeV**.

Article

Observation of an ultra-high-energy cosmic neutrino with KM3NeT



KM3-230213A: UN SUCESO POCO COMÚN



El 13 de febrero de 2023, KM3NeT/ARCA en su configuración de **21 líneas** (10% del detector final), detectó el neutrino más energético jamás observado.

La en

Selección: **ESPAÑA**



EL PAÍS

SUSCRÍBETE

INICIAR SESIÓN

Ciencia / Materia

FÍSICA >

Un telescopio bajo el Mediterráneo detecta el neutrino más energético jamás observado

El descubrimiento “extraordinario” desconcierta a los científicos, que ignoran su origen

ASTROFÍSICA · MEDIO AMBIENTE · INVESTIGACIÓN MÉDICA · MATEMÁTICAS · PALEONTOLOGÍA

Depth
(metres)

0

1,000

2,000

Path of
detected
particle

KM3NeT
telescope

1,800
1,600
1,400
1,200
1,000
800
600
400
200
0

Time (ns)

N

100 m



KM3-230213A: UN SUCESO POCO COMÚN



El 13 de febrero de 2023, KM3NeT/ARCA en su configuración de **21 líneas** (10% del detector final), detectó el neutrino más energético jamás observado.

La en

Selección: **ESPAÑA**



EL PAÍS

SUSCRÍBETE

INICIAR SESIÓN

Ciencia / Materia

The New York Times

FÍSICA >

Un telescopio bajo el mar detecta el neutrino más energético

El descubrimiento “extraordinario” de un neutrino de origen desconocido

‘Ultrahigh Energy’ Neutrino Found With a Telescope Under the Sea

It's the most energetic particle of its kind ever discovered, and scientists have no idea where it came from.

Depth (metres)

0

1,000

2,000

Path of detected particle

KM3NeT telescope

1,800

1,600

1,400

1,200

1,000

800

600

400

200

0

Time (ns)

N

100 m



KM3-230213A: UN SUCESO POCO COMÚN



El 13 de febrero de 2023, KM3NeT/ARCA en su configuración de **21 líneas** (10% del detector final), detectó el neutrino más energético jamás observado.

La en

Selección: **ESPAÑA**



EL PAÍS

SUSCRÍBETE

INICIAR SESIÓN

Ciencia / Materia

FÍSICA >

Un telescopio bajo el neutrino más energético



Emmanuel Macron [in](#) • 3e et +
Président de la République française.

Bravo aux équipes du [CNRS](#) et à leurs partenaires italiens et néerlandais pour cette découverte significative et le projet KM3NeT ! Un pas de plus vers la compréhension des phénomènes énergétiques extrêmes. Continuons à soutenir notre recherche !

The New York Times

'Ultrahigh Energy' Neutrino Found With a Telescope Under the Sea

It's the most energetic particle of its kind ever discovered, and scientists have no idea where it came from.

1,800
600
400
200
0

Time (ns)

400
200
0



100 m



telescope

The international journal of science / 13 February 2025

nature

COSMIC CATCHER

Deep-sea telescope detects
neutrino with highest
energy ever recorded



¡MUCHAS GRACIAS POR VUESTRA ATENCIÓN!

Podéis encontrarnos en...



@vegaific



@km3net



vega@ific.uv.es



gpascua@ific.uv.es



@guillermopascuar

